

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Vliv tepelného zpracování na vlastnosti svarových
spojů modifikované 9% Cr oceli

Effect of Heat Treatment on the Properties of Welded
Joints of modified 9% Cr Steel

Student:

Ondřej Laník

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Laník**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv tepelného zpracování na vlastnosti svarových spojů modifikované 9% Cr oceli**
Effect of Heat Treatment on the Properties of Welded Joints of Modified 9% Cr Steel

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte vlastnosti a svařitelnost modifikovaných 9% Cr ocelí.
2. Navrhněte možné metody svařování předmětných ocelí vč. volby přídavných materiálů.
3. Realizujte svarové spoje z modifikovaných 9% Cr ocelí.
4. Navrhněte optimalizaci tepelného zpracování svarových spojů.
5. Proveďte diskuzi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6
KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava, 2009. 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5
HRIVNÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. VSAV Bratislava, 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5
KOUKAL, J., SCHWARZ, D., SONDEL, M., HAJDÍK, J. *Svařitelnost a vlastnosti svarových spojů, 9%Cr modifikovaných ocelí*. 1. vydání. ČSÚ Ostrava, 2011. 92 s. ISBN 978-80-248-2474


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 13.12.2013
Datum odevzdání: 19.05.2014





Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 7. 4. 2014


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 7. 4. 2014



.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Laník

Adresa trvalého pobytu autora práce: Příbor, Prchalov 84, 742 58

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

LANÍK, O. *Vliv tepelného zpracování na vlastnosti svarových spojů modifikované 9% Cr oceli: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, 54 s. Vedoucí práce: Schwarz, D.

Úvodní část práce tvoří popis a charakteristika mechanických vlastností modifikovaných 9% Cr ocelí P91 a P92. Zaměřuje se na změny mikrostruktury v průběhu popouštění, vznik jednotlivých minoritních fází a precipitační procesy probíhající v průběhu creepové expozice. Tyto procesy jsou popsány v jednotlivých modelových pásmech tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. Účinky tepelného zpracování na změny mechanických vlastností jsou ověřovány na čtyřech zkušebních kusech a to zkouškami svarových spojů, na základě kterých jsou dosažené hodnoty vyhodnoceny, graficky porovnány a zvolen nejvhodnější teplotní režim svařování.

Klíčová slova: ocel, svařování, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

LANÍK, O. *Effect of Heat Treatment on the Properties of Welded Joints of Modified 9% Cr Steel: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2014, 54 p. Thesis head: Schwarz, D.

The introductory part of the thesis consists of a description and characterization of the mechanical properties of modified 9% Cr steel P91 and P92. It focuses on the changes of microstructure during tempering, the emergence of various minority phases and precipitation processes occurring during creep exposure. These processes are described in the individual model ranges heat affected zone of the weldment. Effects of heat treatment on mechanical properties are tested on four test pieces and testing of welded joints, which are based on assessed values, obtained graphically, compared and selected the most suitable welding temperature regime.

Keywords: steel, welding, heat treatment, mechanical properties

Obsah

Seznam použitého značení.....	8
1 Úvod.....	9
2 Oblasti využití modifikovaných žárovevných 9% Cr ocelí	10
3 Charakteristické vlastnosti 9% Cr ocelí (P91 a P92)	11
4 Tepelné zpracování modifikované žárovevné 9% Cr oceli.....	14
4.1 Změny mikrostruktury v průběhu popouštění	16
4.2 Precipitační procesy v modelových pásmech TOO svarového spoje.....	17
4.2.1 Pásmo přehřátí	18
4.2.2 Pásmo normalizace	18
4.2.3 Pásmo částečné překrystalizace	18
4.3 Změny mikrostruktury v průběhu creepové expozice	19
5 Svařitelnost modifikované žárovevné 9% Cr oceli	20
5.1 Tepelné zpracování svarového kovu po svařování – režim svařování	20
6 Metody svařování 9% Cr ocelí (P91 a P92).....	22
6.1 Nejběžněji používané metody svařování:	22
6.2 Technologie mechanizovaného orbitálního svařování	22
7 Přídavné materiály modifikovaných žárovevných 9% Cr ocelí P91 a P92	23
7.1 Přídavné materiály pro homogenní svarové spoje 9% oceli.....	24
7.2 Přídavné materiály pro heterogenní svarové spoje 9% oceli.....	24
7.2.1 Přídavný materiál typu CrMoV	24
7.2.2 Přídavný materiál na bázi Ni působící jako ochrana proti difúzi uhlíku ...	25
8 Vlastnosti svarových spojů 9% Cr ocelí (P91 a P92)	26
8.1 Homogenní svarové spoje	26
8.2 Heterogenní svarové spoje.....	28
9 Svařování zkušebních spojů 9% Cr oceli P92.....	29
9.1 Výchozí mechanické vlastnosti oceli P92	31
9.2 Příprava svarových ploch	32
9.3 Svařování zkušebních kusů	33
9.4 Tepelné zpracování.....	34
9.5 Ověření vlastností svarového spoje	35
9.5.1 Odběr zkušebních vzorků na plechu pro tupý spoj s plným průvarem.....	35
9.5.2 Vizuální kontrola – VT	36

9.5.3	Zkouška prozářením – RT	36
9.5.4	Zkouška na povrchové trhliny – PT	36
9.5.5	Příčná zkouška v tahu – stanovení R_m	37
9.5.6	Vrubová houževnatost – (Charpyho kladivo – zkouška rázem v ohybu) ..	38
9.5.7	Metalografie – makroskopická kontrola	40
9.5.8	Zkouška tvrdosti – HV 10 (dle Vickerse)	42
10	Popis výsledků mechanických zkoušek svarových spojů	44
11	Závěr	47
	Poděkování	48
	Seznam použité literatury	49
	Seznam obrázků	53
	Seznam tabulek	54

Seznam použitého značení

Značka	Název	Jednotka
R _m	mez pevnosti	MPa
R _{mT}	mez pevnosti při tečení (v tlaku)	MPa
R _{p0,2}	mez kluzu	MPa
A ₅	tažnost	%
KV	nárazová práce	J
KVC	vrubová houževnatost	J
HB	tvrdost (Brinell)	-
HV10	tvrdost (Vickers)	-
T	teplota	[°C]
T _{max}	maximální teplota	[°C]
Δt 8/5	doba ochlazení z 800°C na 500°C	s
Ac ₁ , Ac ₃	transformační teploty	[°C]
Ms	teplota počátku martenzitické transformace	[°C]
Mf	teplota konce martenzitické transformace	[°C]
hm %	hmotnostní obsah	%

Žáropevná modifikovaná 9% chromová ocel	9% Cr ocel
Tepelně ovlivněná oblast	TOO
Svarový kov	SK
Základní materiál	ZM
Tepelné zpracování	TZ
Tepelné zpracování po svaření	PWHT
Zkušební kus	z.k.
Svar trubka/plech	T/P

1 Úvod

Práce se zabývá problematikou svařování a probíhajícími mikrostrukturními změnami při svařování tlakových zařízení a potrubí pro dopravu přehřáté páry spojující jednotlivé technologické celky energetických zařízení.

Se stupňujícím se nárokem na výkonnost a efektivnost těchto zařízení, ale také s rostoucím důrazem kladeným na ochranu životního prostředí, dochází k vývoji nových 9-12% Cr ocelí, které mají tyto požadavky zajistit. S ohledem na vznik škodlivých zplodin CO_2 z těchto energetických center, je vývoj směřován ke zvýšení jejich účinnosti na 35 až 45%, a tím ke konstrukci energetických celků využívající nadkritických hodnot páry o teplotě nad 600°C a tlaku vyšším než 26 MPa. [1]

Hlavní problematikou při konstrukci je, že vlivem svařovacích procesů dochází k tepelnému ovlivnění mikrostruktury kolem svarového kovu. Svarový kov a tepelně ovlivněná oblast (dále jen TOO) jsou v průběhu svařování vystaveny velkým teplotním gradientům a dochází k poklesu mechanických vlastností a snížení žárovevnosti těchto svarových spojů.

V konečném důsledku způsobují tyto mechanické změny strukturních vlastností snížení životnosti, spolehlivosti, nevratné poškození a degradaci jednotlivých svařenců. Minimalizaci vzniku těchto problémů se snažíme zabránit použitím nejvhodnějšího tepelného zpracování svarových spojů, které by mělo mít za následek snížení hodnot tvrdosti a pevnosti a zvýšení tažnosti a houževnatosti svarového kovu. Volba optimálního tepelného zpracování také souvisí se snížením finančních nákladů spojených s opravami a renovací těchto technologických zařízení vzniklých v důsledku nesprávně zvolených parametrů tepelného zpracování svařenců.

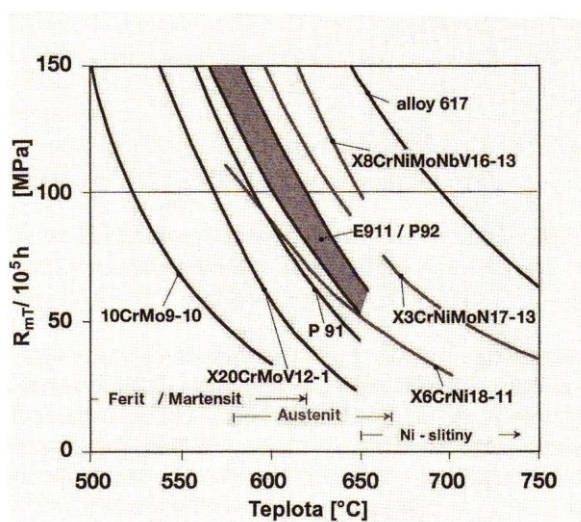
Výsledkem práce je volba optimálního tepelného zpracování, zajišťující požadované mechanické vlastnosti. Tato volba na základě provedení a vyhodnocení zkoušek svarových spojů, ověřující účinky tepelného zpracování na vlastnosti svarového spoje po svařování.

2 Oblasti využití modifikovaných žárovevných 9% Cr ocelí

Největší oblastí využití žárovevných modifikovaných 9% Cr ocelí (dále jen 9% Cr ocelí) je při konstrukci tlakových systémů a zařízení v energetickém, chemickém a teplárenském průmyslu.

V oblasti použitelnosti, charakterizující závislost meze pevnosti na tečení (obr. 1), by nové 9% Cr oceli měli svou charakteristikou splňovat požadavky, vyplývající z minimální celkové životnosti tepelně - energetických zařízení 40 let, což představuje dobu $2,5 \cdot 10^5$ pracovních hodin užitečného výkonu:[1][16]

- $R_{mT/10^5h/600C} > 100$ MPa,
- $R_{p0.2 \min} = 600$ MPa, pro odlitky a tvářené polotovary $R_{p0.2 \min} = 450$ MPa,
- Odolnost proti zkřehnutí v průběhu creepové expozice při pracovních teplotách,
- Dobrá tvařitelnost za tepla, zlepšení prokalitelnosti a svařitelnosti,
- Oproti nízkoaliovaným CrMoV ocelím lepší houževnatost
- Spolehlivá odolnost proti vlivům oxidického prostřední páry



Obr. 1 - Oblast použití 9% Cr ocelí [1]

3 Charakteristické vlastnosti 9% Cr ocelí (P91 a P92)

Pro konstrukci takto namáhaných částí zařízení, jako jsou kotlové trubky, vysokotlaké spojovací potrubí jednotlivých zařízení, rotory a lopatky turbín, nelze použít klasických nízkolegovaných ocelí jako CrMo nebo CrMoV, jejichž mez použitelnosti je do tlaku páry 26 MPa a její teploty maximálně 580°C, nýbrž však nových modifikovaných 9% Cr ocelí, vykazujících mez pevnosti při tečení vyšší než 100MPa/600°C/10⁵ hod.[1]

Tyto 9% Cr ocele mají vyšší odolnost proti korozi, větší prokalitelnost a žárovevnou. Neméně důležitou vlastností je odolnost proti koroznímu praskání a nízký koeficient teplotní roztažnosti. Použitím těchto nových 9% Cr ocelí zajišťujeme funkčnost energetických zařízení o teplotě přehřáté páry až 650°C a přetlaku až 30 Mpa.[1]

Mechanické vlastnosti těchto nových 9% Cr ocelí umožňují využití potrubí s menší tloušťkou stěn, což má za následek snížení hmotnosti celé konstrukce a tím přináší i ekonomické a energetické výhody.[15]

Mezi základní a nejpoužívanější druh 9% Cr ocelí patří žárovevná ocel **P91** (X10CrMoVNb9 - 1), v ČR známa pod označením 17 119.[1] Ocel má nízké procentuální zastoupení uhlíku, obvykle 0,08-0,12%. Legujícími prvky pro obohacení technologických vlastností jsou Mo, V, Nb a N. Karbidotvorné prvky V, Nb tvoří s C a N karbonitridy zajišťující vysokou odolnost proti tečení v celé době jejich životnosti.[17]

Daná ocel se vyznačuje vysokou vrubovou houževnatostí v rozmezí 110 až 205 J při teplotách -80°C až +20°C. Podstatný vliv na tvrdost má tepelné zpracování, resp. teplota popouštění a doba výdrže na této teplotě. Tvrdost dosahuje vlivem nízkého obsahu uhlíku hodnot okolo 250 HV30.[1]

Ocel **P92** (X10CrWMoVNb 9 - 2) je novějším typem konstrukční oceli P91. Tato ocel P92 je martenzitická (9% Cr, 1,75% W, 0,5% Mo) a ve srovnání s ocelí P91 je nová modifikace delegována prvky W a Nb z důvodu zvýšení odolnosti proti creepu. [16]

Chemické složení a základní mechanické vlastnosti ocelí P91 a P92 jsou uvedeny v tabulce 1 a 2.

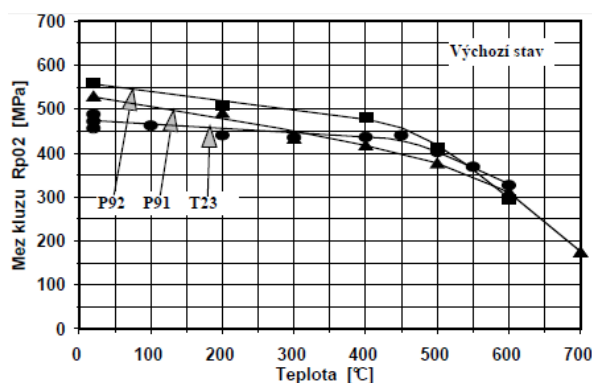
Tab. 1 - Chemické složení ocelí P91 a P92 [10][25]

Materiál	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N	Nb	W	Al	P
P91	0,08 - 0,12	0,20 - 0,50	0,30 - 0,60	8,00 - 9,00	-	0,85-1,05	0,18-0,25	0,03-0,07	0,06-0,10	-	0,02	0,02
P92	0,07-0,13	0,10-0,50	0,30-0,60	8,50-9,50	0,10-0,40	0,30-0,60	0,15-0,25	0,03-0,07	0,04-0,09	1,5-2,0	-	-

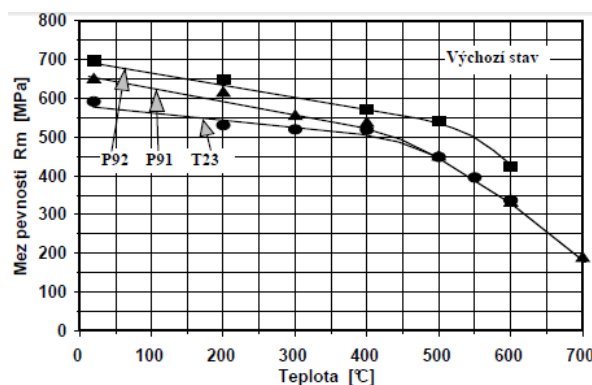
Tab. 2 - Mechanické vlastnosti ocelí P91 a P92 při teplotě 20°C [1][9][16]

Materiál	R_m [Mpa]	$R_{p0,2}$ [Mpa]	A_5 [%]		KCV[J.cm ⁻²]		HB max.
			podél min.	napříč max.	podél min.	napříč max.	
P91	620-850	>450	22	20,2	211	173	224
P92	620-850	>440	24,7	23,8	219	183	230

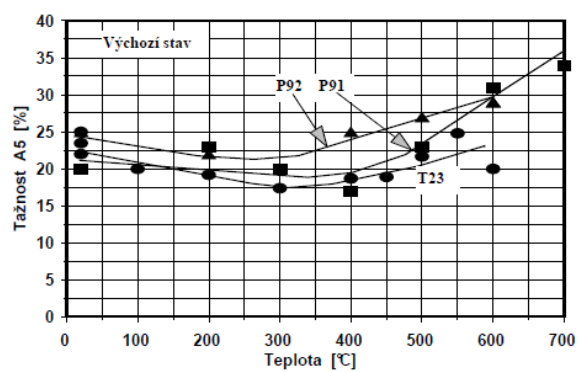
Na obr. 2-5 jsou znázorněny hodnoty teplotních závislostí meze kluzu, meze pevnosti, tažnosti a vrubové houževnatosti 9% Cr ocelí po výchozím tepelném zpracování na jakost, jak je uvedeno na str. 14.



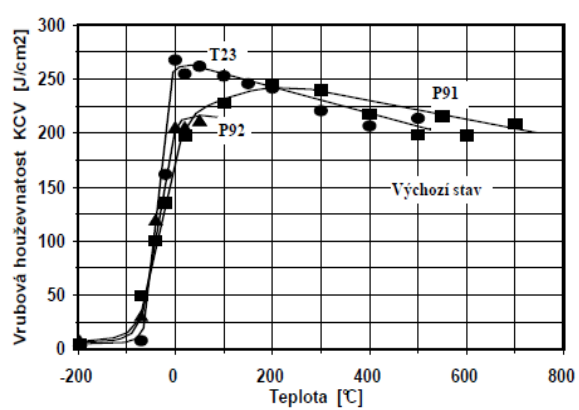
Obr. 2 - Teplotní závislosti meze kluzu 9% Cr ocelí[9]



Obr. 3 - Teplotní závislosti meze pevnosti 9% Cr ocelí[9]



Obr. 4 - Porovnání teplotních závislostí tažnosti 9% Cr ocelí [9]



Obr. 5 - Porovnání teplotních závislostí vrubové houževnatosti 9% Cr ocelí [9]

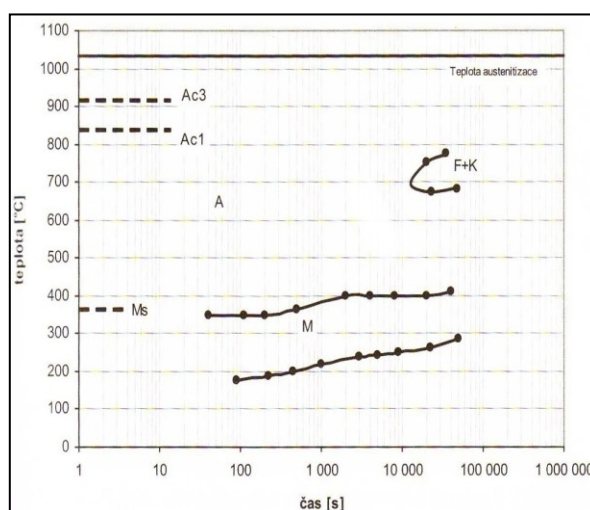
4 Tepelné zpracování modifikované žárovevné 9% Cr oceli

Výchozí tepelné zpracování 9% Cr ocelí se skládá především z normalizace a následného vysokoteplotního popouštění. Teplota austenitizace závisí na chemickém složení ocelí, obvykle se pohybuje v rozmezí 1040-1100°C. Tímto procesem dojde k rozpuštění karbidů a nitridů v matrici. Po ochlazení tvoří strukturu martenzitu a to v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí, dále pak zbytkový austenit a částice Nb. Popouštění se děje v teplotním rozsahu 675-780°C, těsně pod transformační teplotou A_{c1} . Na obr. 6 ARA diagram oceli P91 je znázorněna teplota austenitizace 1040°C a transformační teploty $A_{c1}=850^\circ\text{C}$, $A_{c3}=930^\circ\text{C}$. [1][18]

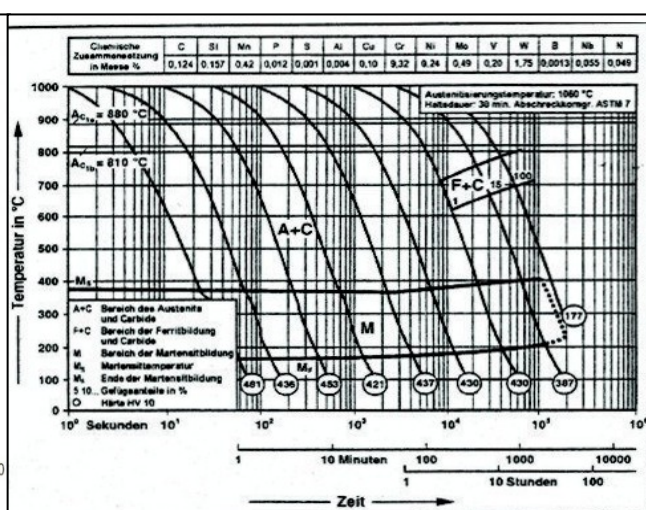
Vyšší obsah legujících prvků (C, Cr, Mo, W, V) ve vzniklém laťkovém martenzitu 9% Cr ocelí má za následek posunutí křivek rozpadu austenitu v ARA diagramech k dlouhým časům. Důsledkem toho přísady legujících prvků zvyšují prokalitelnost i v tlustých průřezích a přispívají k získání martenzitické struktury i při ochlazování na volném vzduchu. Tyto 9% Cr oceli jsou nerezavějící, protože dostatečný obsah chromu vede k vytvoření ochranného oxidického filmu na povrchu oceli. [1][4][20]

Transformační teploty $A_{c1}=810^\circ\text{C}$, $A_{c3}=880^\circ\text{C}$ a teplota austenitizace 1050°C oceli P92 jsou podle ARA diagramu znázorněny na obr. 7.

Počáteční teplota vzniku martenzitu M_s se u obou 9% Cr ocelí podle ARA diagramů pohybuje v rozmezí 350-400 °C a závisí především na obsahu uhlíku v konkrétní oceli. [30]



Obr. 6 - ARA diagram oceli P91 [1]



Obr. 7 - ARA diagram oceli P92 [16]

Závislost popouštěcích parametrů (teplota, čas) 9% Cr ocelí závisí na chemickém složení jednotlivých typů ocelí a na tom, pro jaké účely budou použity. Například oceli legované wolframem (P92) jsou popouštěny při vyšších teplotách nebo časech, než oceli legované molybdenem (P91).[20]

V mikrostruktuře se podle určitého chemického složení, stavu výchozí mikrostruktury a teploty tváření může u jednotlivých 9% Cr ocelí nacházet určité množství zrn δ -feritu.[1][21] Tyto částice δ -feritu, spolu s feritotvornými prvky (Cr, Mo, W, Si, a V) jsou proti okolní martenzitické matici mnohem měkčí a dochází k jejich precipitaci v průběhu popouštění. [21]

Do předpokládaných mikrostrukturních transformací patří zejména snižování celkové plochy hranic zrn, rozpouštění metastabilních a precipitace stabilních minoritních fází.[1]

4.1 Změny mikrostruktury v průběhu popouštění

Tři druhy minoritních fází v mikrostruktuře 9% Cr ocelí:

a) Částice primární fáze **NbX**

Tyto částice zůstávají přítomny v mikrostruktuře díky své relativně nízké rozpustnosti i při vysokých teplotách v průběhu austenitizace. Částice fáze NbX se v oblasti austenitu vyskytují v relativně malém množství a jsou poměrně hrubé (20-40 nm). Svou přítomností brání zhrubnutí austenitického zrna.[1][8]

b) Karbidická fáze **M₂₃C₆**

Částice fáze M₂₃C₆ (150-200 nm) vytvářejí hlavní a důležitou karbidickou minoritní fázi precipitující v oblasti martenzitu v prvotním stádiu popouštění. V této fázi dochází k rozpuštění železa (Fe), wolframu (W) a molybdenu (Mo), prakticky nerozpustitelný je dusík (N) a křemík (Si). Karbidy M₂₃C₆, obvykle nepravidelného tvaru jsou vylučovány na hranicích původních austenitických zrn a hranicích martenzitických desek, důsledkem toho zabraňují růstu feritických zrn.[1][8]

c) Částice sekundární **MX** fáze

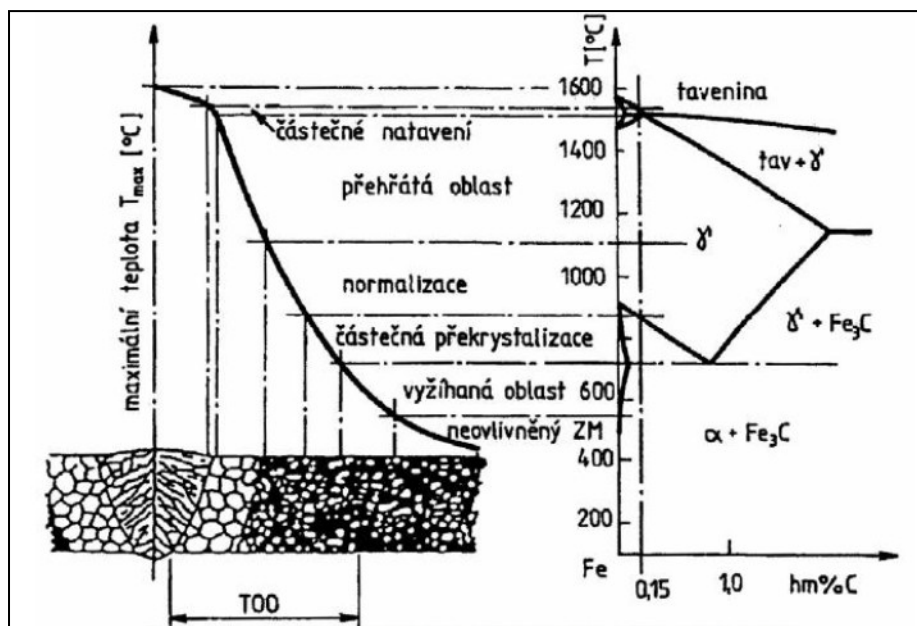
K vylučování částic MX fáze (30-50 nm) dochází uvnitř martenzitických latěk při zhruba 700°C nebo precipitují v průběhu creepové expozice. [1] S touto velmi stabilní sekundární MX fází a precipitací jemných částic souvisí spojitost s vysokou odolností 9% Cr ocelí proti creepu. Jedná se prakticky o čisté nitridy.[1][8][19]

4.2 Precipitační procesy v modelových pásmech TOO svarového spoje

Vlivem svařování dochází k tepelnému ovlivnění mikrostruktury kolem svarového kovu. Svarový kov a TOO jsou v průběhu svařování vystaveny velkým teplotním gradientům a dochází k poklesu mechanických vlastností a snížení žárovevnosti těchto svarových spojů. Tepelně ovlivněná oblast má tři pásma: přehřátí, normalizace a částečného překrystalizování. Každé ze zmíněných pásem je charakterizováno jinými teplotami, rozdílnými mechanickými vlastnostmi a mikrostrukturou. Teplotní cykly při svařování metodou 111 v rámci jednotlivých pásem TOO 9% Cr ocelí jsou znázorněny v tab. 3.[1]

Tab. 3 - Teplotní cykly v pásmech TOO 9% Cr ocelí [1]

Pásmo TOO	T _{max} [C°]	Δt _{8/5} [s]	Výdrž na teplotě	
			teplota [°C]	čas [s]
přehřátí	1350	10	1350	3
normalizace	1050	10	1050	4
část.překrystalizace	890	10	890	4



Obr. 8 - Vliv teplotního cyklu svařování na strukturu svaru [7]

4.2.1 Pásmo přehřátí

Je charakterizováno teplotou solidu a teplotou přehřátí, kdy začíná zrna hrubnout. Hrubnutí zrna u 9% Cr ocelí nastává při svařování elektrickým obloukem až při 1300 °C, to je způsobeno stabilitou karbonitridů vanadu a niobu.[24] V této fázi teplotního cyklu krátkodobého přehřátí na teplotě 1350°C dojde k rozpuštění částic MX fáze a také k rozpuštění většiny karbidotvorných částic $M_{23}C_6$. V mikrostruktuře se vyskytují také hrubé částice NbX, ty zůstávají přítomny v této oblasti i po austenitizaci, vlivem nízké rozpustnosti v austenitu. Při rozpadu austenitu ve fázi ochlazování z teploty 1350°C dojde ke vzniku latkového martenzitu s vysokou hustotou dislokací. V důsledku následného popouštění na teplotě 750°C a precipitačních procesů částic $M_{23}C_6$, dojde ke snížení hustoty dislokací a rozpadu zbytkového austenitu. Výsledná mikrostruktura se tak podobá výchozímu stavu oceli.[1] V pásmu přehřátí TOO a ve svarovém kovu hraje důležitou roli vrubová houževnatost, která je z mechanických vlastností limitujícím parametrem. Z toho vyplývá nutnost svarový spoj po svaření tepelně zpracovat. [2]

4.2.2 Pásmo normalizace

Jemnozrnná oblast TOO, označována jako pásmo normalizace, je tvořena rozmezím pásma přehřátí a teplotou Ac_3 . [26] Rozpadem austenitu vzniká martenzitická latková struktura a hranice martenzitických latěk tvoří filmy zbytkového austenitu. Ve struktuře této fáze se nachází částice NbX, zbytky částic nerozpuštěné MX fáze a také zbytkové $M_{23}C_6$. V průběhu žíhání na teplotě 750°C dochází k rozpadu zbytkového austenitu, snížené hustoty dislokací a tvorbě substrukury pásma TOO. [1]

4.2.3 Pásmo částečné překrystalizace

Limitujícími teplotami stanovující rozmezí určení pásma částečné překrystalizace nebo také pásma interkritických teplot jsou teploty Ac_3 a Ac_1 . Interkritické žíhání nemá tak silný vliv na rozpuštění částic $M_{23}C_6$ a MX fáze a precipitace těchto minoritních fází při žíhání na teplotě 750°C, není tak viditelná jako v pásmu přehřátí a normalizace. Probíhající precipitační procesy a popouštění martenzitu vede k poklesu hustoty dislokací v kovové matici a tvorbě subzrn. Výsledná substruktura po popouštění se stává více homogenní. [1]

4.3 Změny mikrostruktury v průběhu creepové expozice

Mezi nejdůležitější změny struktury a probíhající procesy v průběhu creepové expozice 9% Cr ocelí, patří zejména precipitační zpevnění stabilních minoritních fází, redukce hustoty dislokací a snižování celkové plochy zrn. [19]

V průběhu creepové expozice dochází k precipitaci sekundární MX minoritní fáze, která svou čistě nitridovou charakteristikou ovšem tvoří termodynamicky nestabilní fázi a ta se v důsledku precipitace rozpustí. [1][19]

Další precipitující, poměrně stabilní fází, je Lavesova fáze. Vylučování této fáze se děje buď v průběhu žíhání nebo v následné creepové expozici zmiňovaných 9% Cr ocelí.[19] Vznik Lavesovy fáze se odvíjí od obsahu molybdenu (Mo) a wolframu (W), vznikají tak dva rozdílně stabilní typy této fáze, do teploty 650 °C stabilní Fe_2Mo a teplotně stabilnější fáze Fe_2W . [1] Částice Lavesovy fáze po dlouhodobé teplotní expozici tvoří nejhrubší částice v mikrostruktuře (380-460 nm), ty pak vedou ke zkřehnutí 9% Cr ocelí a poklesu jejich creepové pevnosti a snížené vrubové houževnatosti za pokojových teplot. [1][8]

5 Svařitelnost modifikované žárovevné 9% Cr oceli

Tento druh oceli lze zařadit do skupiny obtížněji svařitelných ocelí. Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím svařitelnost 9% Cr ocelí, je nízký obsah uhlíku. Ten lze srovnat s obsahem uhlíku ve svarovém kovu, což může vést ke snížení hodnot žárovevnosti svarového kovu ve srovnání se základním materiálem.[1]

Oceli tohoto typu se svařují zásadně v zušlechtěném, popouštěném a žíhaném stavu. Jejich prokalitelnost a náchylnost na vznik studených trhlin je zásadním problémem při svařování. Z toho důvodu provádíme před samotným svařováním předehřev s kontrolou mezihousenkové teploty interpass a následný dohřev.[2] Minimální hodnota předehřevu 9% Cr ocelí je 200°C, teplota interpass se podle ČSN EN 1011-2 udává maximálně 350°C, resp. mezi teplotami M_s a teplotou předehřevu. Tím se dosáhne minimální náchylnosti na praskavost. Difuzi vodíku a snížení vnitřního napětí ve svarovém kovu zajišťuje aplikovaný dohřev v rozmezí 200-300°C po dobu 2 – 5 hodin, dle tloušťky konkrétních svařovaných materiálů. Poté se u většiny svarů provede tepelné zpracování po svařování.[1]

5.1 Tepelné zpracování svarového kovu po svařování – režim svařování

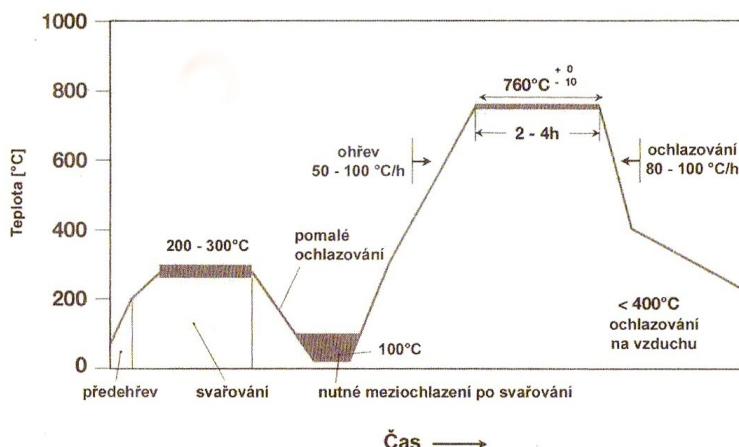
Při svařování 9% Cr ocelí rozlišujeme dva druhy nejpoužívanějších tepelných režimů svařování:

- Svařování s předehřevem a mezihousenkovou teplotou nad $M_s = 350^\circ\text{C}$. Struktura svaru je tvořena velkým množstvím austenitu, která se po následném žíhání rozpadne na feriticko – karbidickou směs. [32]
- Svařování pod M_s , používanější z důvodu snížení trhlin v oblasti TOO. Tento způsob tepelného režimu svařování je znázorněn na obr.9. [32]

Cílem tepelného zpracování po svařování je snížení zbytkových napětí a vyžíhání (popouštění) martenzitické struktury na teplotu 750-760°C. Ve svarovém kovu se tak sníží jeho tvrdost, pevnost a naopak se cíleně zvýší vrubová houževnatost a tažnost. Pro dosažení hodnot KV nad 60J a hodnot 250 HV10 žíháme svarový spoj na teplotě 760°C po dobu nejméně 2 hodin.[1]

Svařujeme-li tvarově členité, tuhé a tlustostěnné materiály nad 25 mm, je nutné zajistit tepelné zpracování okamžitě po svařování a to bez meziochlazení na teplotu vzduchu.[4]

Není-li možno svarový spoj bezprostředně po svařování dále tepelně zpracovat, musí se daný spoj udržovat na teplotě minimálně 100°C, ale pod teplotou M_f (~150°C); pro dokonalou transformaci austenitu na martenzit.[4] V důsledku velkých teplotních výkyvů aplikovaných na svařenec (předehřev, samotné svařování, dohřev), dochází ke vzniku nízkoteplotní žíhací praskavosti, způsobené velkými rychlostmi při procesu ohřívání na žíhací teplotu. Jejich vzniku lze předejít použitím ověřených pomalých rychlostí ohřevu a ochlazování. [1] Čím je tloušťka svarového materiálu větší a čím rychleji probíhá ochlazování, tím větší je náchylnost na vznik pnutí s následným nebezpečím na tvorbu trhlin.[5]



Obr. 9 - Teplotní režim při svařování oceli P91 [1]

6 Metody svařování 9% Cr ocelí (P91 a P92)

6.1 Nejběžněji používané metody svařování:

- **Metoda 111** – ruční obloukové svařování obalenou elektrodou

Tato technologie se nejvíce využívá v kombinaci s metodou 141, kdy kořen svaru se provede metodou 141, a metodou 111 se svařuje výplňová vrstva svaru s použitím větších průměrů elektrod. Svařuje se stejnosměrným proudem (+ pól) a to výhradně bazickým obalem.[1] V případech, kdy se svařuje kořenová vrstva metodou 111, provede se podložení a následné vybroušení kořenové vrstvy (platí jak pro V, tak pro X svar). [22]

- **Metoda 141** – obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu

Metoda se používá pro stehování dílů a svařování kořenové vrstvy tenko i tlustostěnných materiálů, s použitím inertního plynu argonu, zajišťujícího ochranu svarové lázně a přehřáté oblasti před oxidací. Kořenová vrstva nevykazuje žádné vady (póry nebo buliny).[22]

- **Metoda 121** - svařování pod tavidlem drátovou nebo plněnou elektrodou

Svařování touto metodou se aplikuje u rozměrných a tlustostěnných svařovaných komponent. Svařuje se výhradně v poloze vodorovné shora (PA). Současně dochází k napolohování (otáčení) svařence a svarová lázeň je ve vodorovné poloze. [13] Z hlediska produktivity práce je to nejefektivnější metoda; zhotovené svary vykazují vysokou jakost (spolehlivá ochrana kořene před oxidací) a rovněž pravidelné formování svarové housenky. [22]

6.2 Technologie mechanizovaného orbitálního svařování

Technologie svařování velmi rozměrných a tlustých (45 až 180 mm) obvodových svarů různými metodami svařování. Orbitální svařovací automat obíhá kolem místa svaru – vhodné pro montážní svarové spoje. Stroj je vybaven vozíkem s motorickými suporty pro pohyby hořáku. Výhodou je oproti ručnímu obloukovému svařování zkrácení čistého svařovacího času na 1/3 až 1/5. Další výhodou je zhotovení celého svaru (kořenová + krycí vrstva) jednou metodou svařování. Svařuje se zejména metodou TIG (141) do úzkého úkosu (šířka 8,5 až 10 mm) a metodou MAG (136) – plněnou elektrodou.[13]

7 **Přídavné materiály modifikovaných žárovevných 9% Cr ocelí P91 a P92**

Předpisy pro používání přídavných svařovacích materiálů jsou uvedeny v tab. 4.

V této souvislosti převažují svařovací materiály společnosti Böhler Welding a ESAB.

Tab. 4 - Mezinárodní normy pro používání přídavných materiálů [22]

Metoda svařování	Svařované materiály	Norma přídavného materiálu
111	Žárovevné a korozivzdorné oceli	EN 1600
	Nelegované a jemnozrnné oceli	EN ISO 2560
141	Žárovevné a korozivzdorné oceli	EN ISO 14343
	Nelegované a jemnozrnné oceli	EN ISO 636
121	Žárovevné a korozivzdorné oceli	EN ISO 14343
	Nelegované a jemnozrnné oceli	EN ISO 14171
	Tavidla	EN 760
135	Žárovevné a korozivzdorné oceli	EN ISO 14343
	Nelegované a jemnozrnné oceli	EN ISO 14341

Správná volba přídavného materiálu pro svarový spoj 9% Cr ocelí je založena na minimalizaci rozdílů v chemickém složení svařovaných materiálů a schopnosti zaručit žárovevné vlastnosti. Ty jsou podmíněny především legujícími prvky Cr, Mo a V, které spolu s C a N tvoří podstatu precipitace disperzních fází. [10] S ohledem na zaručení požadovaných vlastností svarového spoje, závisí volba přídavného materiálu na druhu svařovaných ocelí a chemickém složení obou ZM. Proto rozlišujeme přídavné materiály pro homogenní a heterogenní (přechodové) svarové spoje.

7.1 Přídavné materiály pro homogenní svarové spoje 9% oceli

Typy spojů: P91/P91, P92/P92

Pro homogenní svarové spoje daných typů se volí přídavný materiál se stejným nebo velmi podobným chemickým složením.[27]

Volba přídavného materiálu pro homogenní svarový spoj 9% Cr oceli je uvedena v tabulce 5.

Tab. 5 - Přídavné materiály pro homogenní spoje[10][27]

Základní materiál	Přídavný materiál – Böhler		
	111	141	121
X10CrMoVNb9-1 (P91)	Thermanit Chromo 9V	Thermanit MTS 3	Thermanit MTS 3 + Marathon 543
X10CrMoVNb9-2 (P92)	Thermanit MTS 616	Thermanit MTS 616	Thermanit MTS 616 + Marathon 543
Základní materiál	Přídavný materiál – ESAB		
	OK 76.98	OK Tigrod 13.38	OK Autrod 13.35 +OK Flux 13.62
X10CrMoVNb9-1 (P91)	OK 76.98	OK Tigrod 13.38	OK Autrod 13.35 +OK Flux 13.62
X10CrMoVNb9-2 (P92)	OK 76.98	OK Tigrod 13.38	OK Autrod 13.35 +OK Flux 13.63

7.2 Přídavné materiály pro heterogenní svarové spoje 9% oceli

Pro svařování heterogenních svarových spojů 9% Cr oceli a nízkolegované žárovečné nebo austenitické oceli se rozdělují přídavné materiály na dva typy.[10]

7.2.1 Přídavný materiál typu CrMoV

Použití pro: P91, P92 + nízkolegovaná žárovečná ocel. Typy nejpoužívanějších kombinací těchto druhů ocelí aplikovaných při svařování tlakových zařízení: [1][12]

- P91 + 10CrMo9-10 (15 313)
- P91 + 14MoV6-3 (15 128)
- P91, P92 + 7CrWVNb9-6 (P23)
- P91, P92 + 7CrMoVTiB10-10 (P24)

7.2.2 Přídavný materiál na bázi Ni působící jako ochrana proti difúzi uhlíku

Použití pro: 9% Cr ocel + austenitická žárovečná ocel:

- P92 + 1.4918 (P92 + X6CrNiMo17-13-2). [20]

Nutno použít přídavný materiál s obsahem niklu minimálně 60 hm. % Ni, 18 hm. % Cr, který působí jako bariéra proti difuzi uhlíku z 9% Cr oceli do austenitické oceli a vyrovnat tak rozdíly ve vzájemné teplotní roztažnosti obou ocelí.[1]

V tabulce 6 je zobrazen přehled přídavných materiálů pro heterogenní svarové spoje určených pro jednotlivé metody svařování.

Tab. 6 - Přídavné materiály pro heterogenní spoje [25][28]

Základní materiál	Přídavný materiál – Böhler		
	111	141	121
10CrMo9-10 (P22)	Thermanit P23/P24	Union I CrMo9-10	CM 2 UP +Flux BB 24
14MoV6-3 (15 128)	Thermanit Chromo 9V	Thermanit MTS 3	EMS 2 CrMo+Flux BB24
7CrWVMoNb9-6 (P23)	Thermanit P23	Union I P23	FOX P23-UP + BB 430
7CrMoVTiB10-10 (P24)	Thermanit P24	Union I P24	FOX P24-UP + BB 430
X6CrNiMo17-13-2 (1.4918)	Thermanit MTS 617	Thermanit MTS 617	CN 18/11-UP + BB 202
Přídavný materiál - ESAB			
10CrMo9-10 (P22)	OK 76.26 OK 76.28	OK Tigrod 13.17 OK Tigrod 13.22	OK Autrod 13.20SC +OK Flux 10.62
14MoV6-3 (15 128)	E-B 321 OK 76.18	C 321	OK Autrod 12.24 +OK Flux 10.71
7CrWVMoNb9-6 (P23)	OK 76.26	OK Tigrod 13.17	OK Autrod 13.20SC +OK Flux 10.62
7CrMoVTiB10-10 (P24)	OK 76.28	OK Tigrod 13.22	OK Autrod 13.20SC +OK Flux 10.62
X6CrNiMo17-13-2 (1.4918)	PZ6161	OK Tigrod 16.75	OK Autrod 308L +OK Flux 10.92

8 Vlastnosti svarových spojů 9% Cr ocelí (P91 a P92)

8.1 Homogenní svarové spoje

Výchozí stav oceli P91 (normalizovaná 1 040 °C/60 min/vzduch a popuštěná 750 °C/120 min/vzduch) a oceli P92 (normalizace 1 050 °C/60 min/vzduch a popuštěná 780 °C/120 min/vzduch)[27].

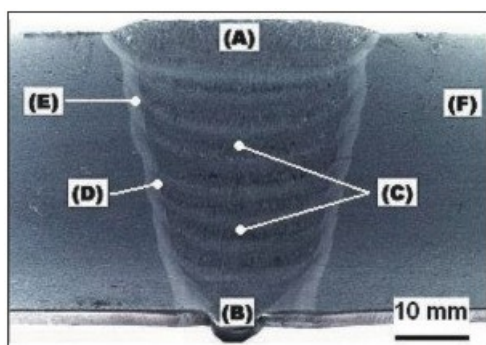
Homogenní svarové spoje ocelí P91 a P92 malých tlouštěk se svařují metodou 141 pro kořenovou oblast svaru a metodou 111 výplňová a krycí vrstva, u silnostěnných materiálů se použije na výplň svaru metoda 121.

V tabulce 7 jsou uvedeny zaručené mechanické vlastnosti základního materiálu 9% Cr oceli P91, P92 a svarového kovu těchto homogenních svarových spojů bez tepelného zpracování po svařování:

Tab. 7 - Zaručené mechanické vlastnosti homogenních spojů[1][31][19]

	R_{p0,2} [Mpa]	R_m [Mpa]	A_{5min} [%]	KV [J]	HV10
P91, P92	> 440	620 - 850	16 - 20	> 40	200 - 260
Svarový kov	> 415	710 - 780	16 - 22	8-28	360 - 410

Makrosnímek svarového spoje P92/P92 na obr. 10 dokumentuje způsob kladení svarových housenek a dobře viditelnou linii ztavení.

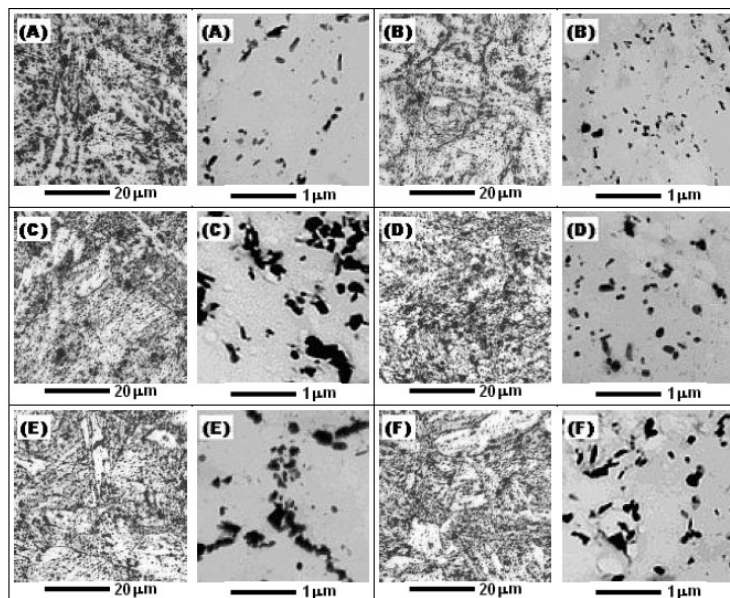


Obr. 10 - Makrosnímek homogenního svarového spoje P92/P92[16]

A - krycí housenka,
B - kořenová housenka,
C - výplňové housenky,
D - linie ztavení,
E - pásmo normalizace,
F - základní materiál

Mikrostruktura homogenního svarového spoje oceli P92 na obr. 11 je tvořena popouštěným martenzitem s disperzí částic $M_{23}C_6$ a MX.[27] Mikrostruktura základního materiálu je homogenní a je tvořena popuštěným martenzitem s disperzí karbidických částic typu $M_{23}C_6$ a MX a s útvary δ -feritu. TOO je velice úzká (2 až 3 mm) a bez defektů, dále je strukturně méně výrazná a bez významného zhrubnutí struktury na rozhraní.[27][16] Útvary δ – feritu se vyskytují v oblastech, které byly při kladení svarových housenek tepelně ovlivněny a k jejich vyloučení došlo především podél hranic austenitických zrn. Oblast intekritického pásma (část. překrystalizace) obsahuje zotavený martenzit a výrazné množství nepopuštěného martenzitu. V oblasti ohřátí nad A_{c1} je výsledná mikrostruktura tvořena směsí zotaveného martenzitu a částic δ -feritu.

[16][31]



Obr. 11 - Mikrostruktura svarového spoje P92/P92[16], vlevo SM (Světelná mikroskopie), vpravo TEM (Transmisní elektronová mikroskopie)

Tvrdost martenzitu po popouštění je vzhledem k nízkému obsahu uhlíku v 9% Cr oceli poměrně nízká a základní materiál dosahuje po svařování hodnot okolo 250 HV10. Tvrdost svarového kovu se pohybuje mezi 360 až 410 HV10 a v TOO se pohybuje v rozmezí 300 až 380 HV10.[1][16]

8.2 Heterogenní svarové spoje

Při vzájemném spojování energetických zařízení je nutno svařovat rozdílné druhy žáropevných materiálů. Pod pojmem heterogenní svarový spoj rozumíme spojení dvou z hlediska chemického složení rozdílných ocelí (nizkolegovaná a středně nebo vysoce legovaná).[10] V důsledku provozních teplot, creepové expozice a tepelného zpracování, (PWHT) dochází k vyvolání difuzních procesů, vedoucích k narušení stability struktury a snižování životnosti tlakových spojů.[1] Výsledkem jsou pak na jedné straně oduhličená pásma TOO se sníženou pevností a na druhé straně nauhlíčená pásma TOO se sníženou vrubovou houževnatostí. Oblast oduhličení je pak kritickou v souvislosti s volbou vhodného přídatného materiálu, který se svým chemickým složením co nejvíce podobá základnímu materiálu jedné nebo druhé oceli (např. P91 nebo P23).[27]

Použití správného přídatného materiálu má vliv na celkovou životnost celého zařízení v průběhu creepové expozice.[10] Difundování uhlíku nelze nikdy zcela zabránit. [1]

Heterogenní svarové spoje je nutno svařovat s malým tepelným příkonem, tzn. malými průměry elektrod, nízkými proudy a vyššími rychlostmi svařování. Popouštění svarových spojů se volí dle tloušťky a požadovaných vlastností tlakového spoje.[1]

Vlastnosti jednotlivých heterogenních spojů:[1]

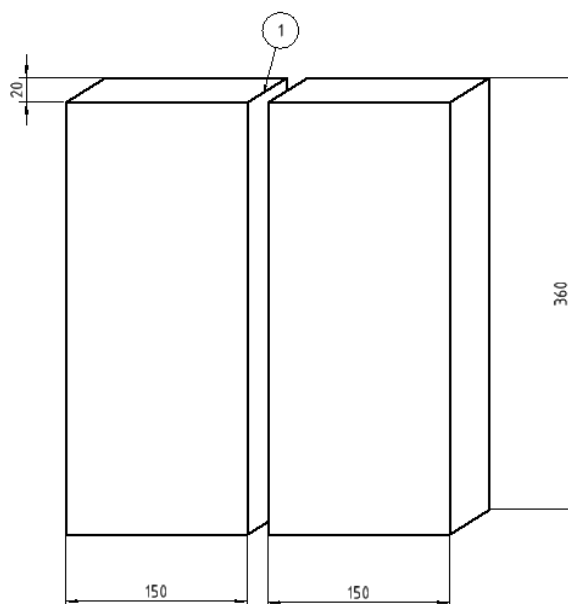
- Pro svarový spoj ocelí P91, P92 – 10CrMo9-10 (15 313), P91, P92 – 14MoV6-3 (15 128), T/P91 – T/P23, T/P91 – T/P24, T/P92 – T/P23 a T/P92 – T/P24 se doporučuje použít přídatný materiál pro oceli P23 a P24, uvedené v tab. 5 a 6. – nejpoužívanějších přídatných materiálů. Svary tohoto typu není zapotřebí svařovat s polštářováním svarových ploch, protože rozdíly v obsazích uhlíku těchto typů svařovaných ocelí nejsou velké. Doporučená žíhací teplota je 750°C. [1]
- Svařujeme-li heterogenní svarový spoj 9% Cr oceli s austenitickou ocelí, použitý pro spojení jednotlivých tlakových zařízení s velkou tloušťkou stěn a pracujících při teplotách nad 610 °C, svařujeme dva rozdílné materiály o rozličném součiniteli tepelní roztažnosti. Použitím austenitického přídatného materiálu by došlo vlivem cyklického namáhání k porušení svarového spoje.[1] Vhodný přídatný materiál je uveden v tabulce 6.

9 Svařování zkušebních spojů 9% Cr oceli P92

Svařování zkušebních spojů bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 15 614-1 stanovující kvalifikaci a zkoušky postupů obloukového svařování ocelí. Samotný homogenní svarový spoj oceli P92 byl proveden technologií 141 a 111 s přídavným materiálem THERMATIT MTS 616.

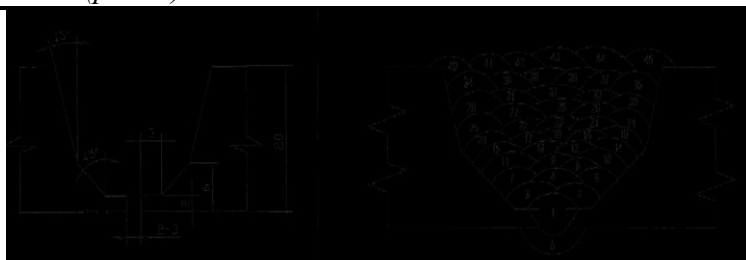
Normalizovaný svarový spoj, na který se aplikoval postup svařování, byl zhotoven ze dvou rozměrově stejných plechů tl.20x150x360 viz obr. 12, přičemž geometrie a rozměry plechů pro zhotovení zkušebního kusu jsou stanoveny dle ČSN EN 15 614-1. Poloha svařování, natočení zkušebního kusu a mezní hodnoty pro úhel sklonu předepisuje norma EN ISO 6947. Předběžná specifikace postupu svařování (pWPS) v tabulce 8 musí být v souladu s normou EN ISO 15 609-1.

Pro účely zkoušení postupu svařování aplikovaného na svarový spoj oceli P92, byly zhotoveny čtyři zkušební kusy (z.k.) s rozdílným tepelným zpracováním po svařování. Na těchto vzorcích se dále prováděly nedestruktivní a destruktivní zkoušky pro ověření vlastností daného svarového spoje, dle příslušných prováděcích a vyhodnocovacích norem.



*Obr. 12 - Zkušební kus pro tupý spoj na plechu s plným průvarem
1 - příprava spoje a sestavení dle pWPS*

Tab. 8 - Předběžná specifikace postupu svařování (pWPS)

<div>PŘEDBĚŽNÁ SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (pWPS) EN ISO 15 906-1</div>													
SPECIFIKACE ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU:													
EN 10 027-1:		X10CrWMoVNB 9-2		Tloušťka materiálu [mm]:						20			
CR ISO 15 608:		6.4+6.4		Tloušťka svar.kovu [mm]:						max. 20			
Další označení:		P92		Vnější průměr [mm]:						-			
Chemické složení:		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N	Nb	W	S	P
		0,07-0,13	0,10-0,50	0,30-0,60	8,50-9,50	0,10-0,40	0,30-0,60	0,15-0,25	0,03-0,07	0,04-0,09	1,5-2,0	-	-
PODMÍNKY SVAŘOVÁNÍ:													
Metoda svařování dle EN ISO 4063:		111,141		Poloha svařování dle EN ISO 6947:						PA			
				Druh svaru:						BW (tupý)			
				Stehování, přípravky						-			
Způsob přípravy úkosů, čištění, svarové hrany:		Strojní opracování. Čištění od mastnoty, vlhkosti, barvy, okují, rzi a jiných nečistot broušením, kartáčováním nebo odmašťovacím prostředkem.											
Čištění během svařování:		Kartáčování nebo broušení dokud všechna struska, rozstřík a další vady neodstraněny.											
Metoda odstranění kořene:		Možnost broušení kořene spoje z vnitřní strany.											
PŘÍDAVNÝ MATERIÁL:													
Typ:		Označení:			Výrobce:			Norma,klasifikace:			Režim sušení:		
Drát		Thermanit MTS616 - 2,0x1000mm			Böhler Udderholm CZ			-			-		
		Chemické složení:											
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N	Nb	W	S	P
		0,10	0,27	0,77	8,62	0,44	0,44	0,18	0,04	0,06	1,72	0,005	0,006
		Mechanické vlastnosti:											
T [°C]		Rp0,2 [MPa]		Rm [MPa]			A (L0=5d) [%]			Nárazová práce [KV/J]			
20		≥560		≥720			≥15			≥41			
Elektroda		Thermanit MTS616 - 3,2x300mm			Böhler			-			-		
		Chemické složení:											
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N	Nb	W	S	P
		0,10	0,25	0,66	8,6	0,8	0,52	0,20	-	0,04	1,75	0,005	0,009
		Mechanické vlastnosti:											
T [°C]		Rp0,2 [MPa]		Rm [MPa]			A (L0=5d) [%]			Nárazová práce [KV/J]			
20		≥560		≥720			≥15			≥41			
Ochranný plyn		I1 (99,995%Ar – 4.8)			-			ČSN EN ISO 14175			-		
		Ochrana svaru, ochrana kořene - zafoukávání (*1.)											
		Průtokové množství plynu – ochrana svaru			10÷15 [l/min]		Průtokové množství plynu – ochrana kořene			7÷10 [l/min]			

PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ:											
Číslo housenky (*2.)	Svařovací proces	Průměr elektrody [mm]:	Proud[A]:		Napětí[V]:		Typ proudu /polarita:	Rychlost svařování [mm/s]:		Tepelný příkon [kJ/mm]:	
			od	do	od	do		od	do	od	do
1-5	141	2	110	135	12,8	15,9	ss, DC -/	1	1,5	0,65	0,96
6-45	111	3,2	115	120	20	24	ss, DC +/	3	4	0,44	0,76
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ:											
Svarový spoj	Teplota předehřevu:	Interpass teplota:	Dohřev:		Tepelné zpracování po svaření (PWHT):		Rychlost ohřevu//rychlost chlazení				
P92-1:	min. 200°C (*3.)	200÷290°C (max. 300°C)	280÷350°C/30min //80÷100°C/30min		760°C/2h		80°C/h // 100°C/h				
P92-2:					760°C/3h						
P92-3:					760°C/5h						
P92-4:					-						
DALŠÍ INFORMACE:											
*1. Použití ochrany kořene musí být zajištěno pro svařování min. 2 vrstev.											
*2. Maximální velikost svarové housenky 2,5mm.											
*3. Předehřev zajištěn elektroohřevem s registrací teplot po celou dobu svařování a dohřevu.											

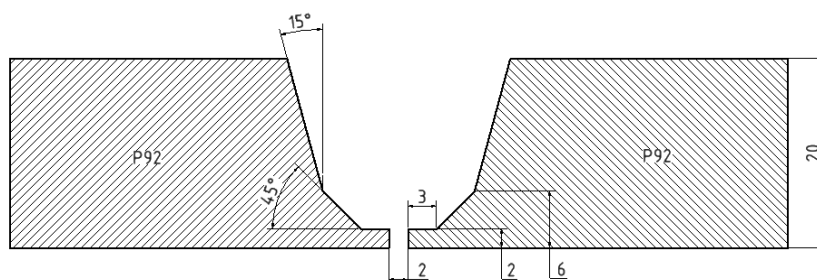
9.1 Výchozí mechanické vlastnosti oceli P92

- Mez pevnosti: $R_m = 713 \text{ MPa}$
- Mez kluzu: $R_{p0,2} = 547 \text{ Mpa}$
- Nárazová práce: $KV = 137 \text{ J}$ ($KCV = 171 \text{ J.cm}^{-2}$)
- Tvrdost: 225 HV10

9.2 Příprava svarových ploch

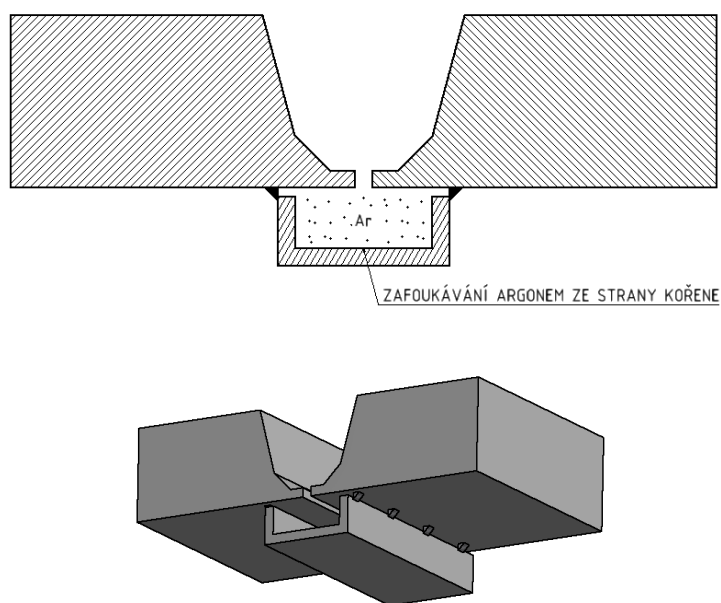
Svarové plochy byly připraveny dle EN 29 692 (obr. 13). Jedná se o tupý jednostranný W – svar se značkou pod ISO 2553 – ∇ .

- tloušťka = 20mm,
- $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 15^\circ$,
- mezeru = 2mm,
- otupení = 2mm,



Obr. 13 - Příprava svarových ploch

Pro ochranu kořene svaru před oxidací bylo provedeno zafoukávání argonem ze strany kořenové vrstvy (obr. 14). Průtok ochranného plynu byl zvolen tak, aby svým tlakem nevytlačoval při svařování tvorbu svarové housenky z mezery mezi svařenci. Argon napomáhá formování svarové housenky.



Obr. 14 - Příprava pro zafoukávání kořenové vrstvy argonem

9.3 Svařování zkušebních kusů

Svařování zkušebních kusů proběhlo kombinací metod obloukového svařování 141 a 111. Samotné svařování a příprava svarového spoje byly provedeny dle přesně stanovených parametrů v pWPS.

Pro předehřev, dohřev, ohřev na popouštěcí teplotu a řízené ochlazování, byl použit tzv. místní ohřev svarového spoje a okolí pomocí elektrického ohřevu odporovými články.

Kontrola teploty předehřevu, teploty interpass a teploty dohřevu byla zajištěna pomocí termočlánků a stanovuje jí norma ČSN EN ISO 13 916.

Kořenová vrstva

Svařování kořenové vrstvy svarového spoje oceli P92 se provedlo metodou 141 s použitím plného drátu Thermanit MTS616 – 2,0x1000mm a s připraveným zafoukáváním svaru ze strany kořenové vrstvy. Parametry svařování jsou následující:

Proud[A]:		Napětí[V]:		Typ proudu /polarita:	Rychlost svařování [mm/s]:		Tepelný příkon [kJ/mm]:	
od	do	od	do		od	do	od	do
110	135	12,8	15,9	ss, DC /-	1	1,5	0,65	0,96

Výplňová a krycí vrstva

Výplňová a krycí vrstva svarového spoje byla provedena metodou 111 s přídavným materiálem Thermanit MTS616 – 3,2x300mm. Parametry svařování jsou následující:

Proud[A]:		Napětí[V]:		Typ proudu /polarita:	Rychlost svařování [mm/s]:		Tepelný příkon [kJ/mm]:	
od	do	od	do		od	do	od	do
115	120	20	24	ss, DC /+	3	4	0,44	0,76

9.4 Tepelné zpracování

Výchozí stav modifikované 9% Cr žárovevné oceli P92:

- Kaleno – 1050 °C/1 hod., chlazeno v oleji
- Popouštěno – 780 °C/2 hod., ochlazení na vzduchu

Tepelné zpracování jednotlivých zkušebních kusů po svařování bylo provedeno žiháním na odstranění vnitřních pnutí s rychlostí ohřevu 80°C/hod na teplotu 760°C. Chlazení z žihací teploty proběhlo v peci při rychlosti ochlazování 100°C/hod. Po poklesu teploty na 400°C následovalo dochlazení na vzduchu.

Označení zkušebních kusů	Teplota žihání	Doba výdrže
P92 – 1	760°C	2hod.
P92 – 2	760°C	3hod.
P92 – 3	760°C	5hod.
P92 – 4	– bez tepelného zpracování po svařování –	

9.5 Ověření vlastností svarového spoje

Rozsah kontroly a zkoušení svarových spojů stanovených dle normy ČSN EN ISO 15 614-1:

Nedestruktivní zkoušky:

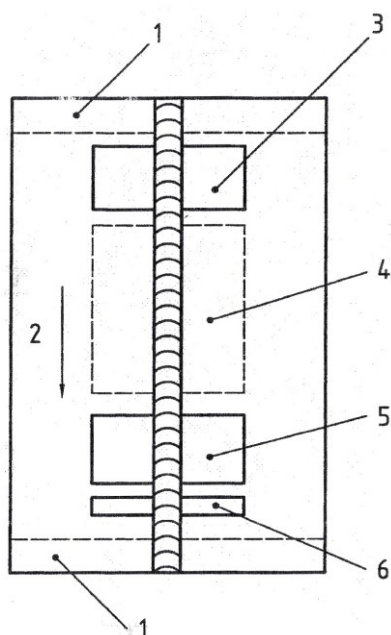
- Vizuální kontrola VT
- Zkouška prozářením – radiografická metoda RT
- Penetrační zkouška na povrchové trhliny PT

Destruktivní zkoušky:

- Pevnost v tahu – stanovení R_m
- Zkouška tvrdosti – HV10 (dle Vickerse)
- Zkouška rázem v ohybu – stanovení KCV (Charpyho kladivo)
- Metalografie – Zkouška makrostruktury

9.5.1 Odběr zkušebních vzorků na plechu pro tupý spoj s plným průvarem

Umístění a odběr zkušebních vzorků pro zkoušky ověření vlastností svarového spoje byly odebrány dle ČSN EN 15 614-1 (obr. 15).



Obr. 15 - Umístění a odběr zkušebních vzorků

1 - odpad

2 - směr svařování

3 - oblast pro 1 vzorek zkoušku tahem (T1)

4 - oblast pro zkoušku rázem v ohybu

5 - oblast pro 1 vzorek zkoušku tahem (T2)

6 - oblast pro 1 vzorek kontroly makrostruktury a 1 vzorek pro zkoušku tvrdosti

9.5.2 Vizuální kontrola – VT

Vizuální kontrola byla uskutečněna v souladu s prováděcí normou ČSN EN 970 a to v celém rozsahu zkoušení. Vyhodnocení bylo provedeno v souladu s ČSN EN ISO 5817, která dále předepisuje typy vad ve svarových spojkách dle ČSN EN ISO 6520 – 1.

9.5.3 Zkouška prozářením – RT

Dle normy ČSN EN 1435 o snímkování radiografickou metodou se stanovil rozsah vnitřních vad ve svarových spojkách a v souladu s normou ČSN EN 12 517 – 1 byly tyto vady v tabulce 9 vyhodnoceny.

Tab. 9 - Zkouška prozářením RT - vady zjištěné na zkušebních vzorcích

Druhy vad dle EN ISO 6520 - 1					
		P92-1	P92-2	P92-3	P92-4
100	trhlina	x	x	x	x
301	struskové vměstky	x	x	x	x
2011	bublina	x	-	x	x
Trhliny v TOO		x	x	x	x
Vyhovuje ANO/NE		NE	NE	NE	NE

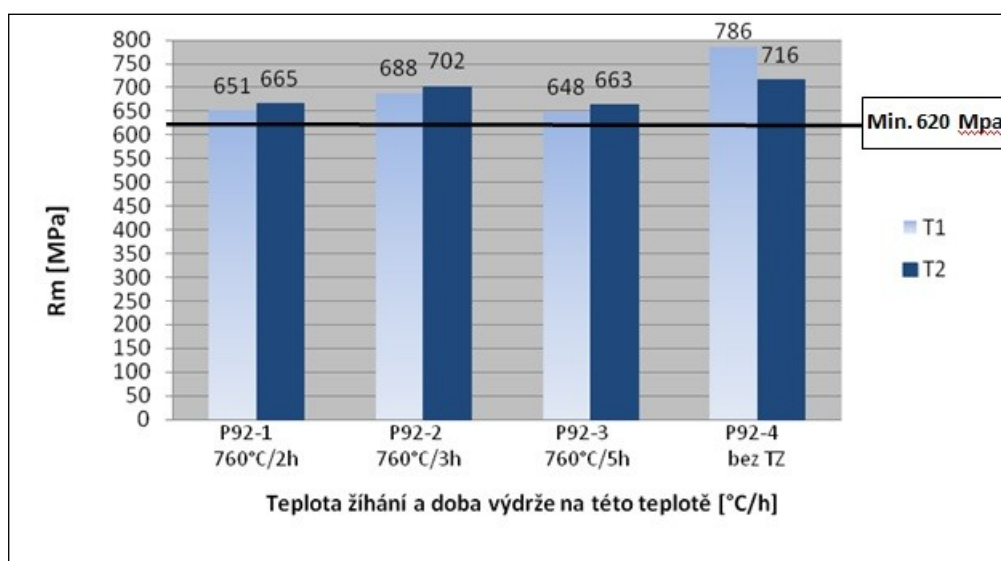
9.5.4 Zkouška na povrchové trhliny – PT

Zkouška na povrchové trhliny – kapilární zkouška se provádí podle normy EN 571 – 1 a následně jsou výsledky hodnoceny normou ČSN EN ISO 23 277 – stupeň přípustnosti 1.

Pro zařazení zkoušky na povrchové trhliny – PT do procesů nedestruktivního zkoušení svarových spojků, je zásadní úspěšné vyhodnocení zkoušky prozářením – RT určující vnitřní vady svarových spojků. V tomto případě byly prozařovací radiografickou metodou prokázány nepřipustné vady ve všech odebraných vzorcích a tím byly svarové spoje označeny za nevyhovující.

9.5.5 Příčná zkouška v tahu – stanovení R_m

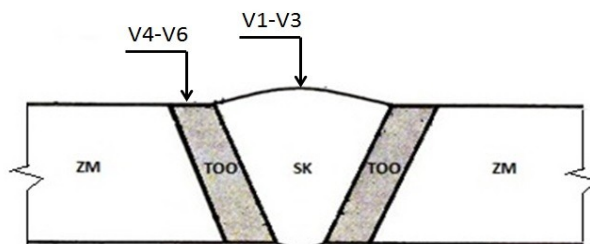
Zkoušení pro příčnou zkoušku tahem pro tupé svarové spoje bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 4136. Dle hodnotící normy EN 15 614-1 nesmí být pevnost v tahu nižší, než je minimální předepsaná pevnost základního materiálu $R_m = 620\text{MPa}$. Hodnoty zjištěné příčnou zkouškou tahem vyhovují zadanému kritériu u všech zkušebních kusů (obr. 16).



Obr. 16 - Závislost meze pevnosti v tahu R_m na TZ oceli P92

9.5.6 Vrubová houževnatost – (Charpyho kladivo – zkouška rázem v ohybu)

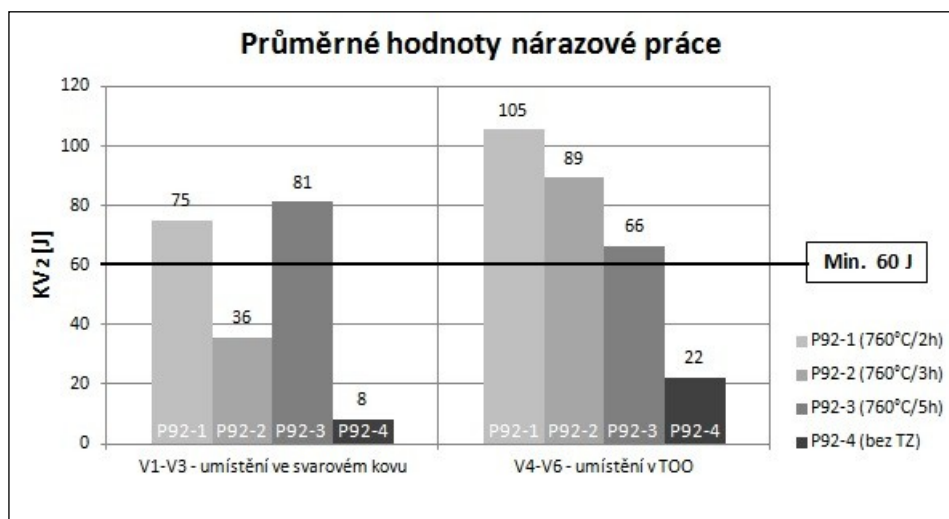
Hodnoty nárazové práce KV uvedené na obr. 18, byly měřeny dle ČSN ISO 148 – 1 ve dvou oblastech svarového spoje 9% Cr oceli P92. Odběr vzorků pro měření hodnot nárazové práce, jak je znázorněno na obr. 17, se prováděl v oblasti SK vruby V1 – V3 a v zóně TOO vruby V4 – V6. Minimální průměrnou hodnotu nárazové práce KV=60J stanovuje norma ČSN EN 10 045 – 1.



Obr. 17 - Umístění vrubů pro odběr vzorků

V1-V3 – odběr vzorku max. 2mm pod povrchem, vrub kolmo k povrchu, umístění v SK ve středu svaru

V4-V6 – odběr vzorku max. 2mm pod povrchem, vrub kolmo k povrchu, umístění 2mm v TOO



Obr. 18 - Hodnoty nárazové práce oceli P92

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že v oblasti SK dosáhla nárazová práce nejvyšších hodnot u z.k. P92-3 s tepelným zpracováním po svařování 760°C/5h. V našem případě docházelo v této oblasti vlivem rozdílných teplotních zpracování jednotlivých vzorků k poměrně velkým výkyvům v hodnotách nárazové práce.

V pásmu TOO se nejvýraznější hodnotou nárazové práce vyznačuje vzorek s označením P92-1 s tepelným zpracováním při teplotě 760°C a dobou výdrže na této teplotě 2 hodiny. V oblasti TOO jsou hodnoty vrubové houževnatosti přímo úměrné tepelnému zpracování po svařování, kdy s prodlužující se dobou výdrže na žíhací teplotě dochází k postupnému snižování hodnot vrubové houževnatosti.

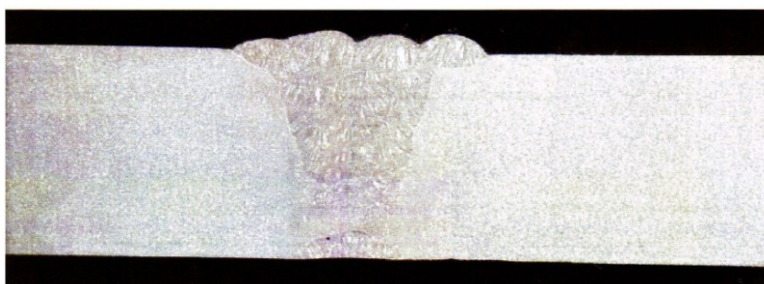
Obecně platí, pokud chceme dosáhnout hodnot nárazové práce vyšší než $K=60J$, musíme svarový spoj tepelně zpracovat. Zkušební kus P92-4 bez tepelného zpracování nevyhovuje svou vrubovou houževnatostí ani v jedné oblasti svarového spoje.

9.5.7 Metalografie – makroskopická kontrola

Kontrola makrostruktury se prováděla na zkušebních kusech upravených broušením a leptáním povrchu dle Adler-Mattinga v souladu s normou ČSN EN 1321, tím byla zajištěna dobrá viditelnost hranice ztavení, TOO a způsobu kladení housenek. Zkouška makrostruktury zahrnuje neovlivněný základní materiál a každá zkouška je zdokumentována jedním snímkem makrostruktury obr. 19-22. Makrostruktura všech zkušebních kusů byla dle ČSN EN 15614-1 **nevyhovující**.

- **z.k. P92-1**

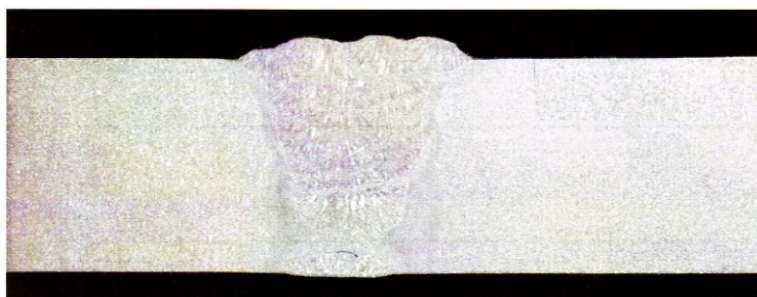
Makrostruktura vykazuje po naleptání leptadlem trhlinu $h=0,8$, 2x studený spoj $h_{\max}=1,8\text{mm}$, struskový vměstek $h=0,4$ a pór $d=0,3$. Šířka TOO je max. $4,5\text{mm}$.



Obr. 19 - Makrostruktura vzorku č.P92- 1

- **z.k. P92-2**

Makrostruktura vykazuje po naleptání leptadlem studený spoj $h=2\text{mm}$, 2x studený spoj $h_{\max}=1,8\text{mm}$, struskový vměstek $h=0,4$ a pór $d=0,3$. Šířka TOO je max. $3,5\text{mm}$.



Obr. 20 - Makrostruktura vzorku č. P92-2

- **z.k. P92-3**

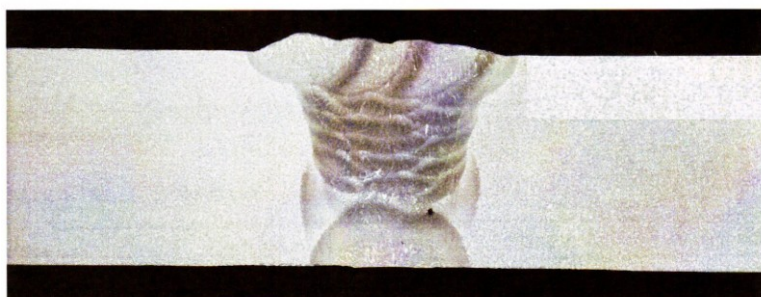
Makrostruktura vykazuje po naleptání leptadlem studený spoj $h=1,6\text{mm}$, struskový vměstek $h=0,4$ a pór $d=0,5$. Šířka TOO je max. 3mm.



Obr. 21 - Makrostruktura vzorku č.P92-3

- **z.k. P92-4**

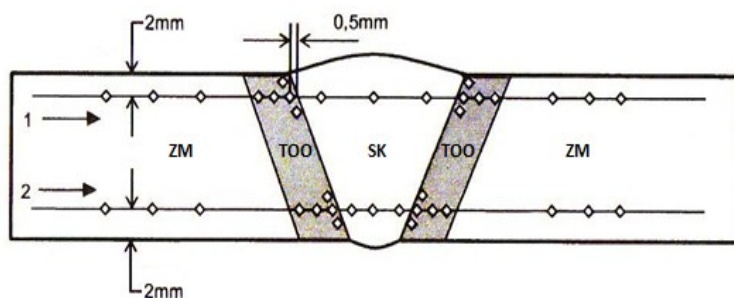
Makrostruktura vykazuje po naleptání leptadlem trhlinu $h=0,8$, 2x studený spoj $h=1,1\text{mm}$ a pór $d=0,6$. Šířka TOO je max. 3,5mm.



Obr. 22 - Makrostruktura vzorku č.P92-4

9.5.8 Zkouška tvrdosti – HV 10 (dle Vickerse)

Měření tvrdosti HV10 bylo provedeno podle požadavků zkušební normy ČSN EN ISO 9015-1 v ZM neovlivněném svařování, obou TOO a v SK. Zkušební vzorky se ze svaru odebírají mechanickým řezáním kolmo na osu svaru. Měření průběhu tvrdosti napříč svarovým spojem se provádí na dvou úrovních, přičemž povrch svaru se upravuje broušením, případně naleptáním pro zviditelnění jednotlivých oblastí svarového spoje. Umístění měřených úrovní a rozmístění jednotlivých vtisků je dle ČSN EN ISO 15 614-1 uvedeno na obr. 23.



Obr. 23 - Průřez svarového spoje oceli P92 a rozmístění vtisků (HV10)

Na obr. 24 jsou znázorněny průběhy tvrdosti jednotlivých zkušebních vzorků na obou měřených úrovních a uvedeny minimální a maximální hodnoty HV10 svarového spoje. Maximálně přípustná hodnota tvrdosti dle ČSN EN 15 614-1 je 350HV10.

- **z.k. P92-1 (obr. 24a)**

V důsledku provedení tepelného zpracování v rozsahu 760°C po dobu 2. hodin, došlo u toho z.k. k vyrovnání hodnot tvrdosti HV10 ve všech přechodových oblastech svarového spoje. Hodnoty v obou ZM se na obou úrovních měření pohybují mezi 160 – 200 HV10. V pásmu TOO a v SK se pak zvýšily hodnoty jen nepatrně (max. 220 HV10).

- **z.k. P92-2 (obr. 24b)**

Hodnoty tvrdosti v oblasti obou ZM se pohybují okolo 200 HV10. V pásmu TOO jsou naměřeny hodnoty se zvýšením tvrdosti o 20 HV10. V přechodové oblasti mezi TOO a SK pak tvrdost dále vzrůstá a ve středu svaru nabývá hodnot okolo 245 HV10.

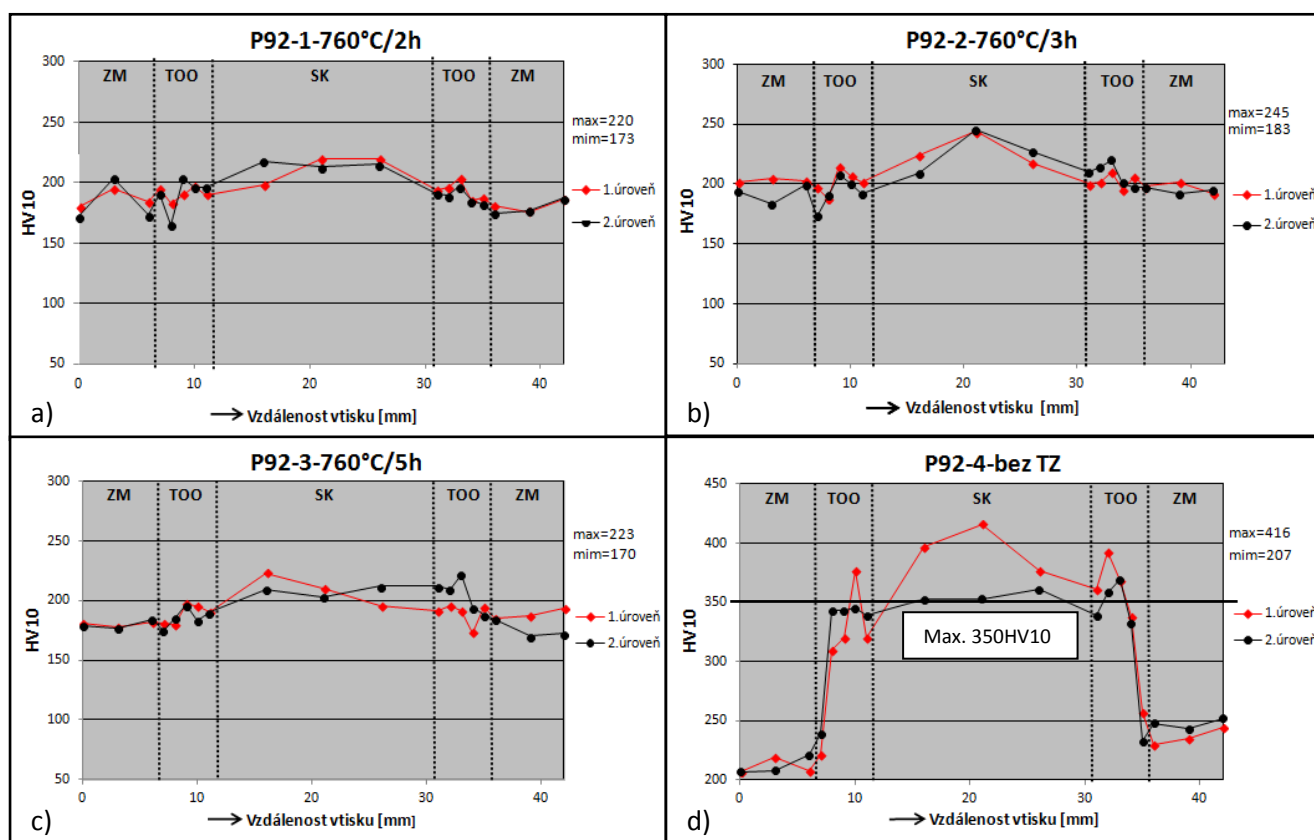
- **z.k. P92-3 (obr. 24c)**

Po tepelném zpracování 760°C a dobou výdrže 5 hodin dosahuje tvrdost obou ZM rozmezí 170 – 200 HV10. V TOO a SK dosahuje tvrdost rozmezí 180 – 220 HV10.

- **z.k. P92-4, bez TZ (obr. 24d)**

Tvrdost ZM neovlivněného svařováním se pohybuje v rozmezí 200 – 250 HV10. V průběhu svařování došlo k tepelně deformačním procesům, které vedly ke změně vlastností svarového spoje. V oblasti TOO se projevuje značné zvýšení tvrdosti nad teplotou přehřátí (380 HV10) a pokles v oblasti teploty A_{c1} na 320 HV10. V oblasti SK na úrovni 1 dochází k velmi významnému zvýšení tvrdosti až nad přípustné kritérium.

Z průběhů tvrdosti lze pak říci, že naměřené hodnoty jsou u vzorku velmi vysoké ve všech oblastech svarového spoje. V porovnání s ostatními tepelně zpracovanými vzorky se největší rozdíl v hodnotách tvrdosti projevuje v pásmu TOO, kdy v průběhu svařování dochází u z.k. bez TZ ke skokovému zvýšení měřených hodnot v tomto pásmu.



Obr. 24 - Průběhy tvrdosti HV10 vzorků P92-1,2,3,4

10 Popis výsledků mechanických zkoušek svarových spojů

Vyhodnocující normy:	Příčná zkouška tahem – ČSN EN ISO 15 614 – 1
	Rázem v ohybu – ČSN EN 15 614 – 1
	Makrostruktura – ČSN EN 15 614 – 1
	Tvrдость – ČSN EN 15 614 – 1

Dle normy ČSN EN 15 614-1 byla k jednotlivým metodám zkoušení svarových spojů definována přípustná kritéria a podle nich vyhodnoceny naměřené hodnoty.

Z vyhodnocení destruktivních zkoušek provedených na zkušebních kusech dle této normy, udávající příslušná kontrolní kritéria mechanických hodnot vyplývá, že vzorek s označením P92-1 s TZ 760°C/2hod. nejvíce vyhovuje kladeným požadavkům a zároveň odpovídá daným kritériím přípustnosti.

Vyhodnocení z.k. P92-1:

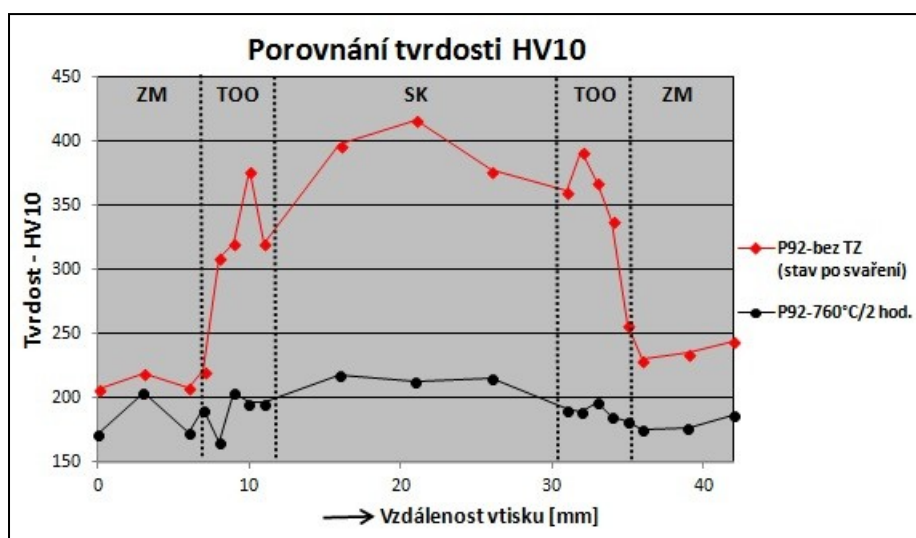
Naměřeno:	min÷max dle ČSN EN 15 614-1
KV = 75÷105 J (KCV = 93÷131 J.cm ⁻²)	KV = min. 60 J
Rm = 651÷665 MPa	Rm = 620÷850 MPa
HV10 = 215 (SK)	HV10 = max. 350
= 210 (kořen svaru)	
= 170÷200 (TOO)	

Vzorek P92-4 bez TZ je v běžné praxi ve stavu po svařování svými hodnotami zcela nevyhovující. V důsledku neprovedení TZ po svařování nedošlo k poklesu tvrdosti a vrubová houževnatost dosahuje hodnot mnohem nižších, než je požadované minimum. Odolnost proti vnitřním a vnějším silám díky vysoké pevnosti R_m zůstává zachována, vysoká tvrdost až 416HV10 však zvyšuje náchylnost ke křehkému lomu. Požadovaná životnost a spolehlivost tohoto zkušebního kusu je tak velmi nízká. Pro svařování tlakových nádob a potrubí pro dopravu přehřáté páry dle výsledků měření je tak zkušební kus nepoužitelný.

Vyhodnocení z.k. P92-4:

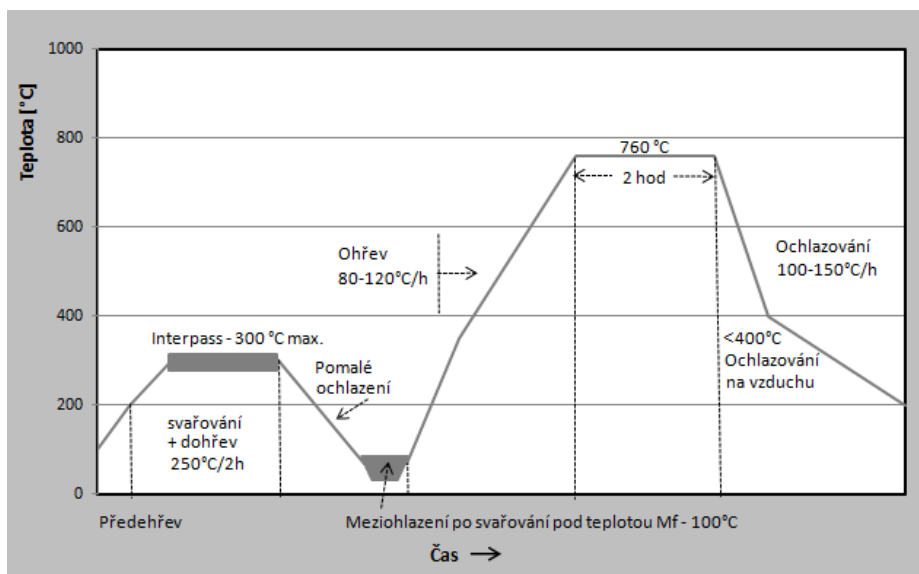
Naměřeno:	min÷max dle ČSN EN 15 614-1
KV = 8÷22 J (KCV = 10÷28 J.cm ⁻²)	KV = min. 60 J
Rm = 716÷786 MPa	Rm = 620÷850 MPa
HV10 = 416 (SK)	HV10 = max. 350
= 350 (kořen svaru)	
= 340÷370 (TOO)	

Naměřené hodnoty tvrdosti HV10 na obr. 25 dokumentují vliv žíhacího procesu na změnu průběhu tvrdosti v jednotlivých přechodových pásmech svarového spoje oceli P92.



Obr. 25 - Hodnoty tvrdosti svarového spoje v závislosti na TZ

Pro zachování vysokých hodnot vrubové houževnatosti v SK a TOO oceli P92, se po svaření dle obr. 26 provedlo tepelné zpracování v podobě popouštění při teplotě 760°C a dobou výdrže na této teplotě 2 hodiny. V důsledku takto vhodně aplikovaného teplotního režimu dojde k popouštění martenzitické struktury, poklesu tvrdosti v SK a tím ke zvýšení vrubové houževnatosti.



Obr. 26 - Nejvhodnější teplotní režim při svařování oceli P92

11 Závěr

Homogenní svarový spoj na plechu oceli P92 byl proveden obloukovými metodami svařování 111 a 141. Příprava svarových ploch a samotné svařování bylo stanoveno dle pWPS, která zahrnuje i tepelné zpracování po svaření všech svařovaných vzorků.

Nevyhovující mechanické vlastnosti oceli P92 jsou v pásmu přehřátí TOO, kdy vlivem vysokých rychlostí ochlazování při tvorbě martenzitické struktury došlo k poklesu plastických vlastností svarového spoje. Cílem popouštění svarového spoje po svařování je zvýšení křehkolomových vlastností, kterých lze dosáhnout bez změny struktury a bez podstatných změn původních vlastností oceli, jako je žárovevnost a žáruvzdornost.

Zvýšení tvrdosti v oblasti TOO jsme eliminovali množstvím vneseného tepla, popř. teplotou předehřevu. Vlivem TZ po svařování došlo v oblasti TOO ke zvýšení vrubové houževnatosti ($KV = 105J$), s přibývajícím dobou výdrže na žíhací teplotě 2 – 5 hodin však hodnoty klesají k minimální přípustné hranici 60J.

Provedením zkoušky rázem v ohybu a tahové zkoušky byl jednoznačně potvrzen vliv TZ na vlastnosti svarových spojů, resp. svarového kovu 9% Cr oceli P92.

Zkouška tvrdosti HV10 prokázala zvýšení tvrdosti v oblasti SK, což zapříčinil vyšší obsah uhlíku v přídavném materiálu. Místa s vysokou tvrdostí se tak stávají nejvíce náchylnými na vznik studených trhlin. Pro ocel P92 je důležité tepelným zpracováním snížit hodnoty tvrdosti a meze kluzu a zvýšit hodnoty vrubové houževnatosti a tažnosti. Z toho vyplývá nutnost provádět tepelné zpracování po každém svařování.

Na základě vyhodnocení těchto zkoušek mechanických vlastností svarového spoje byl určen nejvhodnější teplotní režim svařování se stanovenou teplotou žíhání 760°C a dobou výdrže na dané teplotě 2 hodiny, zaručující vysoký poměr pevnostních a plastických vlastností v jednotlivých oblastech svarového spoje oceli.

Návrh optimálního postupu svařování a tepelného zpracování svarového spoje má významnou roli při použití modifikované 9% Cr oceli pro jednotlivá technologická zařízení. Modifikovaná ocel P92 umožňuje použití menších tloušťek stěn tam, kde dříve byly použity jiné typy materiálů o větších tloušťkách stěn. Zároveň tak dochází ke snížení celkové hmotnosti konstrukce v oblasti energetického strojírenství.

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování doc. Ing. Drahomírovi Schwarzovi, CSc. za materiálové podklady, odbornou a zároveň příjemnou konzultaci a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Dále všem, kteří mi poskytli informace a cenné rady pro vypracování práce a hlavně mé rodině za podporu po celou dobu studia.

Seznam použité literatury

Knihtisky

- [1]. Jaroslav KOUKAL, Drahomír SCHWARZ, Martin SONDEL a Jiří HAJDÍK. *Svařitelnost a vlastnosti svarových spojů 9% Cr modifikovaných žárovevých ocelí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011, 92 s. ISBN 978-80-248-2474-1.
- [2]. Jaroslav KOUKAL, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [3]. BERNASOVSKÝ, Peter, Alojz BLECHA, Ján BOŠANSKÝ a Vladimír MAGULA. *Náuka o materiáli a zvariteľnosti ocelí*. 1. vyd. Bratislava, 1996, 240 s. Učebnice pro kurzy technologov zvarania, č.13 . ISBN 80-88734-19-3.
- [4]. HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Vyd. 1. Bratislava: Veda, 1989, 343 s. ISBN 80-224-0016-5.
- [5]. NĚMEC, Josef. *Svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí*. Praha: SNTL, 1975, Druhé, přepracované vydání.
- [6]. KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Skripta SVAŘOVÁNÍ I*. Ostrava, 2005.
- [7]. KOVAŘÍK, Rudolf. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 185 s. ISBN 80-708-2697-5.

Elektronické články

- [8]. *MIKROSTRUKTURNÍ ANALÝZA SVAROVÉHO SPOJE OCELI P92 PO CREEPOVÉ EXPOZICI.* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/5%20%C5%BDvakov%C3%A1.pdf>
- [9]. *POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ MODERNÍCH ŽÁRUPEVNÝCH OCELÍ PO DLOUHODOBÉM ŽÍHÁNÍ.* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_07/Lists/Papers/038.pdf
- [10]. *VLASTNOSTI SVAROVÉHO SPOJE MODIFIKOVANÉ 9% CR OCELI (P 91) S NÍZKOLEGOVANOU CRMOV OCELÍ.* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_00/papers/716.pdf
- [11]. *KOMPLEXNÍ OBNOVA ELEKTRÁRNÝ TUŠIMICE II.* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/lisy_tusimice409.pdf
- [12]. *VLIV PŘECHODOVÝCH SVAROVÝCH SPOJŮ NA ŽIVOTNOST TLAKOVÝCH SYSTÉMŮ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ.* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/svary_web.pdf
- [13]. *DODÁVKY VYSOKOTLAKÉHO SPOJOVACÍHO POTRUBÍ.* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/mopoPdf.pdf>
- [14]. *OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SVAROVÉHO SPOJE OCELI P91 A 15128 PO DLOUHODOBÉ TEPLTNÍ EXPOZICI.* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/overeni-vlastnosti-svaroveho-spoje-oceli-p91-a-15128-po-dlouhodobe-teplotni-expozici>
- [15]. *REALIZACE VYSOKOTLAKÉHO SPOJOVACÍHO POTRUBÍ V RÁMCI KOMPLEXNÍ OBNOVY ELEKTRÁRNÝ TUŠIMICE II.* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/modranska409.pdf>
- [16]. *APLIKAČNÍ OMEZENÍ ŽÁROPEVNÉ OCELI P92.* [online]. [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/aplikacni-omezeni-zaropevne-oceli-p92/>

- [17]. SPEKTRUM, ESAB: *SVAŘOVACÍ MATERIÁLY VHODNÉ PRO SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLŮ PRACUJÍCÍCH ZA ZVÝŠENÝCH TEPLŮT*. [online]. 2007 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: http://www.esab.cz/cz/cz/news/upload/spektrum1_2007CZ.pdf
- [18]. MACHALA, Jan. *STRUKTURA A VLASTNOSTI SVAROVÉHO SPOJE ROTORU PARNÍ TURBÍNY* [online]. Brno, 2011 [cit. 2013-03-14]. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39701.
- [19]. MARTÍNEK, Petr. *MIKROSTRUKTURA A ŽÁROPEVNÉ VLASTNOSTI SVAROVÉHO SPOJE OCELI P92* [online]. Plzeň, 2009 [cit. 2013-03-14]. Západočeská Univerzita v Plzni. Dostupné z: http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST%28SVOC%29/_2009/_sbornik/PapersPdf/Ing/Martinek_Petr.pdf.
- [20]. *SVAROVÉ SPOJE ŽÁROPEVNÝCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH V ENERGETICE*. [online]. 28.11.2010. [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/svarove-spoje-zaropevnych-materialu-pouzivanych-v-energetice/>
- [21]. MARTÍNKOVÁ, Jana. *VLIV DELTA FERITU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI OCELÍ A METODY STANOVENÍ JEHO OBSAHU*. [online]. [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST%28SVOC%29/_2010/_sbornik/PapersPdf/Mgr/Martinkova_Jana.pdf
- [22]. KLIKA, STANISLAV. *SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÝCH NÁDOB [ONLINE]*. BRNO, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce DOC. ING. LADISLAV DANĚK, CSC. Bakalářská práce. 2012 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/14067/Klika_Stanislav_Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20tlakov%C3%BDch%20n%C3%A1dob.pdf?sequence=
- [23]. Ocelové konstrukce. *ROSTOU POŽADAVKY NA MATERIÁLY PRO ENERGETIKU* [online]. 2005 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/rostou-pozadavky-na-materialy-pro-energetiku/>

- [24]. *SIMULACE STRUKTURNÍ STABILITY SVAROVÝCH SPOJŮ ŽÁROPEVNÝCH OCELÍ*. [online]. 2005 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_05/papers/79.pdf
- [25]. *PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY PRO STAVBU ELEKTRÁRNY* [online]. 2011 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.bohler-uddeholm.cz/czech/files/Svary_oceli_elektrarny.pdf
- [26]. D. JANDOVÁ, J. KASL a V. KANTA. *ŽÁROPEVNOST A MIKROSTRUKTURA SVAROVÝCH SPOJŮ OCELI P91* [online]. 2006 [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_06/papers/169.pdf
- [27]. SVOBODOVÁ Marie. *HOMOGENNÍ A HETEROGENNÍ SVAROVÉ SPOJE ŽÁROPEVNÝCH OCELÍ* [online]. 2009 [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_09/Lists/Papers/039.pdf
- [28]. *Böhler Welding: WELDING CONSUMABLES FOR THERMAL POWER STATIONS* [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: http://www.boehler-welding.com/german/files/Thermalpower_ENG.pdf
- [29]. TŮMOVÁ Daniela a Marie SVOBODOVÁ. 18. - 20. 5. 2010, Rožnov pod Radhoštěm, Česká Republika *SLEDOVÁNÍ KINETIKY STRUKTURNÍCH ZMĚN BĚHEM DLOUHODOBÉHO ŽÍHÁNÍ PŘECHODOVÝCH SVARŮ OCELI P91* [online]. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_10/lists/papers/207.pdf
- [30]. *MECHANISMUS A KINETIKA ROZPADU AUSTENITU*. [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.ateam.ic.cz/rozpad_austenitu.pdf
- [31]. ROŽNOVSKÁ, Gabriela a Vlastimil VODÁREK. *ROZBOR HOMOGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE SUPERMARTENZITICKÉ OCELI TYPU 13Cr6Ni2,5Mo*. [online]. 2003 [cit. 2014-02-13]. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_03/papers/199.pdf
- [32]. HODIS, Zdeněk. *DIFÚZE UHLÍKU A DUSÍKU VE SVAROVÝCH SPOJÍCH ŽÁROPEVNÝCH FERITICKÝCH OCELÍ*. [online]. 99 s. [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/3854/disertace_Hodis.pdf?sequence=1

Seznam obrázků

Obr. 1 - Oblast použití 9% Cr ocelí [1].....	10
Obr. 2 - Teplotní závislosti meze kluzu 9% Cr ocelí[9]	12
Obr. 3 - Teplotní závislosti meze pevnosti 9% Cr ocelí[9]	12
Obr. 4 - Porovnání teplotních závislostí tažnosti 9% Cr ocelí [9]	13
Obr. 5 - Porovnání teplotních závislostí vrubové houževnatosti 9% Cr ocelí [9]	13
Obr. 6 - ARA diagram oceli P91[1].....	14
Obr. 7 - ARA diagram oceli P92[16].....	14
Obr. 8 - Vliv teplotního cyklu svařování na strukturu svaru [7].....	17
Obr. 9 - Teplotní režim při svařování oceli P91 [1]	21
Obr. 10 - Makrosnímek homogenního svarového spoje P92/P92[16].....	26
Obr. 11 - Mikrostruktura svarového spoje P92/P92[16],	27
Obr. 12 - Zkušební kus pro tupý spoj na plechu s plným průvarem	29
Obr. 13 - Příprava svarových ploch	32
Obr. 14 - Příprava pro zafoukávání kořenové vrstvy argonem	32
Obr. 15 - Umístění a odběr zkušebních vzorků	35
Obr. 16 - Závislost meze pevnosti v tahu R_m na TZ oceli P92	37
Obr. 17 - Umístění vrubů pro odběr vzorků	38
Obr. 18 - Hodnoty nárazové práce oceli P92	38
Obr. 20 - Makrostruktura vzorku č. P92-2	40
Obr. 19 - Makrostruktura vzorku č.P92-1	40
Obr. 21 - Makrostruktura vzorku č.P92-3	41
Obr. 22 - Makrostruktura vzorku č.P92-4	41
Obr. 23 - Průřez svarového spoje oceli P92 a rozmístění vtisků (HV10)	42
Obr. 24 - Průběhy tvrdosti HV10 vzorků P92-1,2,3,4	43
Obr. 25 - Hodnoty tvrdosti svarového spoje v závislosti na TZ	45
Obr. 26 - Nejvhodnější teplotní režim při svařování oceli P92	46

Seznam tabulek

Tab. 1 - Chemické složení ocelí P91 a P92 [10][25]	12
Tab. 2 - Mechanické vlastnosti ocelí P91 a P92 při teplotě 20°C [1][9][16]	12
Tab. 3 - Teplotní cykly v pásmech TOO 9% Cr ocelí [1]	17
Tab. 4 - Mezinárodní normy pro používání přídatných materiálů [22].....	23
Tab. 5 - Přídatné materiály pro homogenní spoje[10][27]	24
Tab. 6 - Přídatné materiály pro heterogenní spoje [25][28].....	25
Tab. 7 - Zaručené mechanické vlastnosti homogenních spojů[1][31][19]	26
Tab. 8 - Předběžná specifikace postupu svařování (pWPS)	30
Tab. 9 - Zkouška prozářením RT - vady zjištěné na zkušebních vzorcích.....	36